

TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

**PREDICCIÓN DEL OLEAJE MEDIANTE TÉCNICAS DE
CONJUNTOS EN LA COSTA CATALANA**

Autor/a

Héctor Hernández Miguel

Tutor/a

**Manuel Espino Infantes
Elena Pallarès López**

Departament

Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental (EHMA)

Intensificació

Intensificació en Enginyeria Marítima

Data

Juny 2015

Predicción del oleaje mediante técnicas de conjuntos en la costa catalana

Autor: Héctor Hernández Miguel

Tutores: Manuel Espino Infantes, Elena Pallarès López

La costa catalana es una zona densamente poblada, en la cual se desarrollan una gran cantidad de actividades, como la pesca, la navegación, el turismo, la gestión costera, etc. Debido a que estas actividades pueden ser vulnerables a condiciones climáticas extremas, son necesarios sistemas capaces de predecir el oleaje. Por desgracia el Mar Mediterráneo Occidental es una zona altamente heterogénea y con una gran variabilidad, y como resultado la predicción del oleaje es complicada de realizar.

Actualmente la mayoría de los métodos de predicción del oleaje son deterministas, los cuales generan una única salida a partir de la predicción de un único campo de viento. Pero cualquier predicción del viento contendrá cierto grado de incertidumbre, imposible de gestionar con estos métodos y que conducirá a errores de predicción, ya que la predicción del oleaje es penalizada por un mal pronóstico del campo de viento. Un enfoque alternativo, actualmente aplicado con éxito en la predicción meteorológica, es considerar una predicción mediante técnicas de conjuntos. Estas técnicas se utilizan para hacer frente a la incertidumbre en las condiciones iniciales, que es una de las principales fuentes de error cuando se pretende predecir la evolución de un sistema caótico. Tomando inspiración de este enfoque, en esta tesina se propone aplicar las técnicas de conjuntos para la predicción del oleaje.

Con este objetivo, se ha implementado el modelo SWAN en el mar Mediterráneo Occidental con una resolución espacial de 15 km., y alimentado por un conjunto de campos de viento de la Global Ensemble Forecast System (NOOA), que tienen una resolución espacial de 100 km. y una resolución temporal de 6 horas. Este conjunto de campos de viento incluye una previsión denominada control, además de 10 miembros adicionales y la media de éstos. Para evaluar la calidad de predicciones se han validado con los datos cinco boyas de Puertos del Estado, situadas en el área de estudio y amarradas en aguas profundas y costeras. Se han considerado dos episodios de temporal, marzo 2013 y enero de 2015, respectivamente.

Los resultados de las simulaciones incluyen mapas de altura de olas, mapas de probabilidad y series temporales de la altura de ola y el periodo. Los miembros del conjunto han mostrado el comportamiento esperado, mostrado más acuerdo entre sí cuando el horizonte de pronóstico es más reducido. Desafortunadamente, la comparación con los datos reales de las boyas muestra que a pesar de que los picos del temporal se detectaron con éxito, existe una infravaloración de la altura del oleaje y de la duración del temporal. La predicción del periodo fue satisfactoria.

De estos resultados se pudo concluir que la mala resolución del campo de viento es la principal causa de la subestimación de la altura de ola, a pesar de que los campos de viento presentan bastante exactitud en las posiciones de boyas. Este comportamiento se explica por la reducción de la transferencia de energía del viento mar. Esta subestimación introduce un handicap en la utilización de los mapas de probabilidad que era la principal ventaja de la predicción por conjuntos. Por esta razón, la conclusión de esta tesis es que serían necesarios campos de viento de mayor resolución para aplicar estas técnicas. Desafortunadamente conjuntos de viento de esta resolución por lo general no están disponibles.

Predicció de l'onatge mitjançant tècniques de conjunts a la costa catalana

Autor: Héctor Hernández Miguel

Tutors: Manuel Espino Infantes, Elena Pallarès López

La costa catalana és una zona densament poblada, en la qual es desenvolupen una gran quantitat d'activitats, com la pesca, la navegació, el turisme, la gestió costanera, etc. A causa de que aquestes activitats poden ser vulnerables a condicions climàtiques extremes, són necessaris sistemes capaços de predir l'onatge. Desgraciadament el Mar Mediterrani Occidental és una zona altament heterogènia i amb una gran variabilitat, i com a resultat la predicció de l'onatge és complicada de realitzar.

Actualment la majoria dels mètodes de predicció de l'onatge són deterministes, els quals generen una única sortida a partir de la predicció d'un únic camp de vent. Però qualsevol predicció del vent contindrà cert grau d'incertesa, impossible de gestionar amb aquests mètodes i que conduirà a errors de predicció, ja que la predicció de l'onatge és penalitzada per un mal pronòstic del camp de vent. Un enfocament alternatiu, actualment aplicat amb èxit en la predicció meteorològica, és considerar una predicció mitjançant tècniques de conjunts. Aquestes tècniques s'utilitzen per fer front a la incertesa en les condicions inicials, que és una de les principals fonts d'error quan es pretén predir l'evolució d'un sistema caòtic. Prenent inspiració d'aquest enfocament, en aquesta tesina es proposa aplicar les tècniques de conjunts per a la predicció de l'onatge.

Amb aquest objectiu, s'ha implementat el model SWAN al mar Mediterrani Occidental amb una resolució espacial de 15 km., alimentat per un conjunt de camps de vent de la Global Ensemble Forecast System (NOOA), que tenen una resolució espacial de 100 km. i una resolució temporal de 6 hores. Aquest conjunt de camps de vent inclou una previsió anomenada control, a més de 10 membres addicionals i la mitjana d'aquests. Per avaluar la qualitat de prediccions s'han validat amb les dades 5 boies de Ports de l'Estat, situades a l'àrea d'estudi i amarrades en aigües profundes i costaneres. S'han considerat dos episodis de temporal, març 2013 i gener de 2015, respectivament.

Els resultats de les simulacions inclouen mapes d'altura d'onades, mapes de probabilitat i sèries temporals de l'alçada d'ona i el període. Els membres del conjunt han mostrat el comportament esperat, mostrat més acord entre si quan l'horitzó de pronòstic és més reduït. Desafortunadament, la comparació amb les dades reals de les boies mostra que tot i que els pics del temporal es van detectar amb èxit, hi ha una infravaloració de l'altura de l'onatge i de la durada del temporal. La predicció del període va ser satisfactòria.

D'aquests resultats es va poder concloure que la mala resolució del camp de vent és la principal causa de la subestimació de l'alçada d'ona, tot i que els camps de vent presenten força exactitud en les posicions de boies. Aquest comportament s'explica per la reducció de la transferència d'energia del vent mar. Aquesta subestimació introdueix un handicap en la utilització dels mapes de probabilitat que era el principal avantatge de la predicció per conjunts. Per aquesta raó, la conclusió d'aquesta tesi és que serien necessaris camps de vent de més resolució per aplicar aquestes tècniques. Desafortunadament conjunts de vent d'aquesta resolució en general no estan disponibles.

Wave Ensemble forecast in the Catalan Coast

Author: Héctor Hernández Miguel

Supervisors: Manuel Espino Infantes, Elena Pallarès López

The Catalan Coast is a highly populated area, which has a great concentration of activities taking part near or in the sea, like fisheries, sailing, tourism, coastal management, etc. Because all of these activities are vulnerable to extreme sea weather conditions wave forecasting systems are needed. Unfortunately the Western Mediterranean Sea is a highly heterogeneous and variable area, and as result the wave forecast in these regions is quite complicated to perform.

Nowadays the most spread wave forecasting methods are deterministic, generating a single output from a single forecasted wind field. But it is know that wind forecast comes with an amount of uncertainty, which is impossible to manage with these methods, and as a consequence we are addressed errors, because a bad wind field forecasting will result on a bad wave forecast.

One proposed approach, currently successfully applied in wind forecasting, is to consider an ensemble forecast. This technique is used to deal with initial conditions uncertainty, which is the one of the main sources of error in the prediction of the evolution of a chaotic system. Taking inspiration from this approach, a wave ensemble forecasting method is proposed in this graduation thesis.

To this end, the SWAN wave model has been implemented for the Western Mediterranean sea, with a spatial resolution of 15 km. and feed with a wind field ensemble from the and Global Ensemble Forecast System (NOOA) with a spatial resolution of 100 km. and 6 hours of temporal resolution. The wind field ensemble includes a control forecast, plus 10 ensemble members and the mean of all the members. In order to benchmark forecasting quality, data of “Puertos del Estado” from five buoys located in the study area, moored in deep and coastal waters, have been used for the validation. Two different storm episodes have been considered, March 2013 and January 2015 respectively.

Simulation results included wave height maps, probability maps and temporal series of significant wave height and period. From these results it can be observed that ensemble members behave as expected, showing more agreement when forecast horizon is shorter. Unfortunately, forecasting results comparison with real data from the buoys shows that despite storm peaks were successfully detected, an underestimation of the significant wave height and storm duration is present. Wave period simulation was quite accurate.

From these results one can conclude that the bad resolution of the wind field is the main cause of the underestimation of the significant wave height despite the wind fields are quite accurate in the buoy locations. This behavior is explained due to the reduced energy transfer from wind to sea water.

This underestimation introduces a handicap to the applicability of probability forecasting which was the main advantage ensemble forecasting. For this reason the conclusion of this thesis is that better winds would be necessary in order to apply ensemble wave forecasting successfully. Unfortunately wind ensembles of this resolution are usually not available.

Agradecimientos

El autor quiere agradecer la colaboración *Puertos del Estado* por proporcionar los datos de las medidas de boyas pertenecientes a su red, que han sido fundamentales para la elaboración de esta tesina. También se agradece a la *National Oceanics and Atmospheric* poner a disposición en acceso abierto las predicciones de campos de vientos de sus modelos.

Finalmente quiero agradecer especialmente a mis tutores, Manuel Espino y Elena Pallarès, su guía a lo largo de la realización de esta tesina, así como su disponibilidad y amabilidad en todo momento.

Memoria

Índice

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	3
1.1. PROBLEMÁTICA: LA PREDICCIÓN DEL ESTADO DEL MAR	3
1.1.1. La Predicción mediante Técnicas de Conjuntos	3
1.2. INTERÉS Y MOTIVACIÓN: LOS TEMPORALES EN LA COSTA CATALANA	3
1.3. DEFINICIÓN DEL OBJETO Y ALCANCE DE LA TESINA.....	4
1.4. ORGANIZACIÓN DE LA TESINA	5
2. ESTADO DEL ARTE.....	6
2.1. CONCEPTOS BÁSICOS Y DEFINICIONES	6
2.1.1 Convención sobre viento y oleaje	7
2.2 MODELOS DE GENERACIÓN DE OLEAJE: EL MODELO SWAN.....	8
2.2.1 ¿Por qué SWAN?	8
2.2.2 Descripción del modelo SWAN.....	9
2.2.3 La ecuación (espectral) del balance de la acción	9
2.2.4 Esquemas numéricos.....	12
2.3. PREDICCIÓN MEDIANTE TÉCNICAS DE CONJUNTOS	12
2.3.1 Limitaciones en la Predicciones Deterministas.....	13
2.3.2 Introducción a la Predicción por Técnicas de Conjuntos	13
2.3.3 Construcción de los Conjuntos (ensembles)	15
3. FUENTES DE DATOS	18
3.1 DATOS DE BATIMETRÍA	18
3.2 DATOS DE OLEAJE DE BOYAS (PARA VALIDACIÓN DE RESULTADOS).....	19
3.2.1 Descripción de las redes de boyas de Puertos del Estado	19
3.2.2 Boyas utilizadas en este estudio	21
3.3 DATOS DE VIENTO	23
3.3.1 Características y formato de la Base de Datos.....	23
3.3.2 Campos de viento utilizados y resolución	24
3.4 VALIDACIÓN DATOS DE VIENTO.....	25
3.4.1. Diagramas de Taylor.....	25
3.4.2. Resultados de la validación de los datos de viento.....	27
4. METODOLOGÍA: GENERACIÓN DE PREDICCIONES DE OLEAJE	29
4.1 PREPARACIÓN DE LOS DATOS	29

4.2 PREPROCESO (Escribir archivo SWAN)	30
4.2.1 Encabezado	30
4.2.2 Malla computacional.....	30
4.2.3 Condiciones iniciales y de contorno.....	31
4.2.4 Entradas del modelo	31
4.2.5 Opciones de modelización de la física y configuración de los métodos numéricos ..	31
4.2.6 Salidas del modelo	32
4.2.7 “Lock up”	32
4.3 CÁLCULOS EN SWAN	32
4.3.1 Consideraciones sobre el Coste Computacional	33
4.4 POSTPROCESO EN MATLAB.....	33
5. RESULTADOS.....	34
5.1. PRESENTACIÓN Y VISUALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS	34
5.2. EPISODIO DEL 23/02/2013 al 09/03/2013	34
5.2.1 Mapas de altura de ola.....	35
5.2.2 Mapas de probabilidad	40
5.2.3 Series temporales de altura y periodo del oleaje	45
5.2. EPISODIO DEL 21/01/2015 al 04/02/2015	54
5.2.1 Mapas de altura de ola.....	55
5.2.2 Mapas de probabilidad	57
5.2.3 Series temporales de altura y periodo de oleaje	59
6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	76
6.1. PRINCIPALES CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	76
6.2. LA RESOLUCIÓN DEL CAMPO DE VIENTOS.....	77
6.3. PROPUESTAS DE SOLUCIÓN	77
6.4. VIABILIDAD DE LA CORRECCIÓN DEL ERROR DE LA PREDICCIÓN	78
6.4.1 Resultados de la aplicación de un modelo lineal	78
7. CONCLUSIONES.....	80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	85
ANEXO. VALIDACIÓN DE VIENTOS.....	A.1

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. PROBLEMÁTICA: LA PREDICCIÓN DEL ESTADO DEL MAR

La predicción del estado del mar, que es caracterizado por sus parámetros (alturas de ola, periodos, etc.), es relevante para un gran número de actividades que comprenden entre otras: la navegación, la pesca, las actividades turísticas, la gestión portuaria y del litoral, la operación de plataformas offshore, etc. (AEMET, 2015)

Por tanto, es necesario disponer de buenas predicciones de oleaje que permitan gestionar de manera adecuada aquellos episodios en los que el oleaje sea un impedimento para el desarrollo de las actividades mencionadas anteriormente, y en su caso implantar un sistema de alertas para poder adoptar medidas preventivas con el objetivo de mitigar posibles daños en situaciones de riesgo.

Los métodos tradicionales de predicción de oleaje consisten en salidas deterministas de un modelo, que es alimentado a partir de la predicción del campo de viento. Desafortunadamente las predicciones de viento siempre conllevan cierto grado de incertidumbre, que no puede ser tratada mediante estos métodos. Esto conduce inevitablemente a errores en la predicción, puesto que si una predicción del campo de viento se sobreviene errónea inducirá a su vez una predicción incorrecta del estado del mar.

1.1.1. La Predicción mediante Técnicas de Conjuntos

Una solución propuesta para tener en cuenta el efecto de los errores en las condiciones iniciales de un modelo es generar no sólo un único pronóstico, sino un conjunto de previsiones (una distribución completa de los posibles estados de previsiones). Es por esta razón que se espera que el uso de técnicas de predicción por conjuntos (conocidas como *ensemble forecast*) proporcione una mejor predicción al proporcionar no solo una posible situación futura, sino también una probabilidad asociada a ella, al trabajar con varias predicciones simultáneamente. Estas técnicas ya han demostrado su utilidad en la predicción atmosférica, especialmente en las predicciones a largo plazo, que compensa sus mayores costes computacionales (Du, 2007).

Adicionalmente con este método, al disponer de la probabilidad asociada a la previsión, es posible mejorar la gestión del riesgo en función de la probabilidad esperada del evento y de la gravedad de los potenciales daños.

1.2. INTERÉS Y MOTIVACIÓN: LOS TEMPORALES EN LA COSTA CATALANA

La Costa Catalana es un área densamente poblada, que genera una alta presión sobre el litoral y las zonas marítimas cercanas a su área de influencia. Además, es difícil realizar la predicción del oleaje con precisión debido a unas características geográficas heterogéneas –entre ellas una

orografía compleja- que influyen y se reflejan en los campos de viento, los campos de corrientes y el oleaje, principalmente en las zonas cercanas a la costa (Alomar et al., 2014) (Pallares et al, 2014).

Asimismo, pese a que la percepción común considera el Mar Mediterráneo como un mar tranquilo y calmado esto no es lo que indican los registros históricos, en los cuales podemos observar que -normalmente durante los meses de otoño e invierno- se producen temporales frecuentemente (Guillén, 2008).

Históricamente en la Costa Catalana, son principalmente los episodios de temporal de levante los que generan alturas más elevadas, generalmente entre los 3 y 6 metros, aunque también pueden producirse episodios extremos como el temporal de Diciembre del 2008, que causó graves daños (Bolaños et al., 2009).

En ocasiones estos episodios recurrentes también son objeto de la atención de los medios de comunicación, debido al impacto que puede llegar a tener el oleaje asociado no solo en las actividades marítimas (navegación, operación de puertos, etc.) sino sobre el público en general. Los siguientes ejemplos ponen de relieve la importancia del problema:

- Afectaciones en la circulación de trenes de la línea RENFE de Barcelona-Mataró el 9 Marzo de 2010 (La Vanguardia, 2010)
- Pérdida arena en las playas el 22 Noviembre de 2011 (Cedó, 2011)
- Impacto sobre zonas turísticas con cierre de algunos negocios por el oleaje en el Puerto de Barcelona el 7 Marzo de 2013 (El Periódico, 2013)

Por tanto se pone de manifiesto que resulta de interés disponer un sistema que pueda predecir con la mayor exactitud y antelación posible la ocurrencia de estos fenómenos.

1.3. DEFINICIÓN DEL OBJETO Y ALCANCE DE LA TESINA

El objetivo de esta tesina es evaluar el desempeño y la potencial aplicabilidad de las técnicas de conjuntos en la Costa Catalana en comparación con las predicciones deterministas, en especial durante episodios de temporales marítimos.

Esta evaluación se realizará a partir de las predicciones de oleaje obtenidas a partir del modelo SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*) (Booij et al, 1999) (Ris et al., 1999), alimentado por la predicción de campos de viento que provee la NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) contrastando los resultados obtenidos con las medidas experimentales de boyas pertenecientes a Puertos del Estado («Puertos del Estado»).

El proceso seguido se representa en el esquema en la figura siguiente. A partir de la batimetría y un conjunto de predicciones de viento se utilizará un modelo SWAN para generar predicciones del oleaje, que se validará mediante los registros de las medidas de boyas.

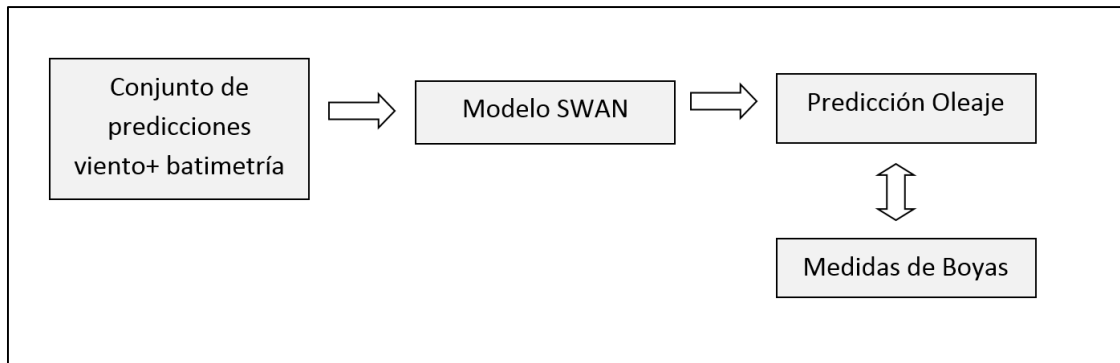


Figura 1: Esquema del proceso propuesto. A partir de la batimetría y un conjunto de predicciones de viento se utilizará un modelo SWAN para generar predicciones del oleaje, que se validará mediante los registros de las medidas de boyas.

Siguiendo este proceso se proponen las siguientes tareas a realizar a largo de esta Tesina:

- Validar los datos de viento utilizados para generar las predicciones.
- Generar mapas de la predicción de la altura de oleaje
- Generar mapas de la predicción de la probabilidad de oleaje
- Generar series temporales de las predicciones de la altura y el periodo del oleaje y contrastar los resultados obtenidos con las medidas registradas por las boyas.
- Evidenciar las diferencias entre las predicciones de los distintos miembros del conjunto.
- Extraer conclusiones sobre el funcionamiento del modelo y la calidad de las predicciones.

1.4. ORGANIZACIÓN DE LA TESINA

Los contenidos de la presente tesina se organizan de acuerdo a la siguiente estructura:

- En el Capítulo 2 se resumen los aspectos principales de la predicción del oleaje y de las técnicas de predicción de conjuntos.
- En el Capítulo 3 se detallan las fuentes de datos utilizadas para alimentar las simulaciones durante la elaboración del trabajo.
- En el Capítulo 4 se presenta la metodología utilizada para generar las predicciones de oleaje.
- En el Capítulo 5 se exponen los resultados obtenidos.
- En el Capítulo 6 se discuten estos resultados.
- Finalmente en Capítulo 7 se dedica a la conclusión de la Tesina.

2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se realiza una introducción a las bases teóricas del modelo de generación del oleaje utilizado, en especial en lo que atañe al mecanismo de generación del oleaje por el viento. Posteriormente también se exponen los principios de las técnicas de predicción por conjuntos.

2.1. CONCEPTOS BÁSICOS Y DEFINICIONES

El oleaje es generado fundamentalmente por la aportación de la energía del viento (aunque también existen otras causas, que no consideraremos en esta tesina). Este viento, del cual depende la predicción del oleaje, posee en cada punto velocidad en las tres direcciones del espacio. No obstante, en las aplicaciones de predicción de oleaje el viento se describe únicamente por las dos componentes horizontales y a una altura de 10 metros sobre el nivel del mar.

El oleaje producido en la zona de generación (o *fetch*) se denomina mar de viento (*wind sea*), que es muy desordenado y sin una dirección clara. Este oleaje puede propagarse a otras zonas y entonces se denomina mar de fondo (*swell*). Debido a los fenómenos que se producen durante la transmisión del oleaje éste sufre una transformación de sus características y se vuelve más regular y con una dirección claramente dominante.

El estado del mar se puede caracterizar por diferentes parámetros estadísticos (lo cual implica implícitamente una ventana temporal de medida). Entre ellos los más comunes, y que van a ser utilizados en esta tesina son los siguientes:

- Altura Significante del oleaje (H_s): La altura del oleaje varía de una ola a otra, por eso se suele utilizar un término que representa la altura media del tercio más alto de olas denominado altura significativa y se denota H_s . La razón de esta definición es porque tiene una buena correspondencia con las medidas visuales del oleaje.
- Periodo Medio cruce por cero (T_z): El oleaje está compuesto de una superposición de grupos de ondas de distintos periodos. El periodo medio de todas estas ondas se denomina periodo medio del oleaje y se denota T_z ó T_{m02} (la notación refleja el método usado para calcularlo pero se trata del mismo concepto).

Una herramienta muy útil en el tratamiento del oleaje y que se utiliza habitualmente es considerar su espectro, el cual permite caracterizar la contribución de cada frecuencia al oleaje total en cada dirección. Además también permite calcular los parámetros del estado del mar en el dominio frecuencial. De hecho los parámetros anteriores se pueden definir como:

$$H_s = 4 \sqrt{\iint E(\omega, \theta) d\omega d\theta} \quad [\text{Ec. 1}] \qquad T_{m02} = 2\pi \sqrt{\frac{\iint \omega^2 E(\omega, \theta) d\omega d\theta}{\iint E(\omega, \theta) d\omega d\theta}} \quad [\text{Ec. 2}]$$

Donde $E(\omega, \theta)$ es la densidad de varianza (equivalente a la energía) del espectro, ω la frecuencia angular absoluta y θ la dirección.

En la figura siguiente se muestra un ejemplo de representación del espectro de energía del oleaje según su dirección. En este ejemplo se observa como existe un oleaje de frecuencia bien definida (mar de fondo) con dirección sur junto un oleaje con un componente frecuencial peor definido de dirección este (mar de viento).

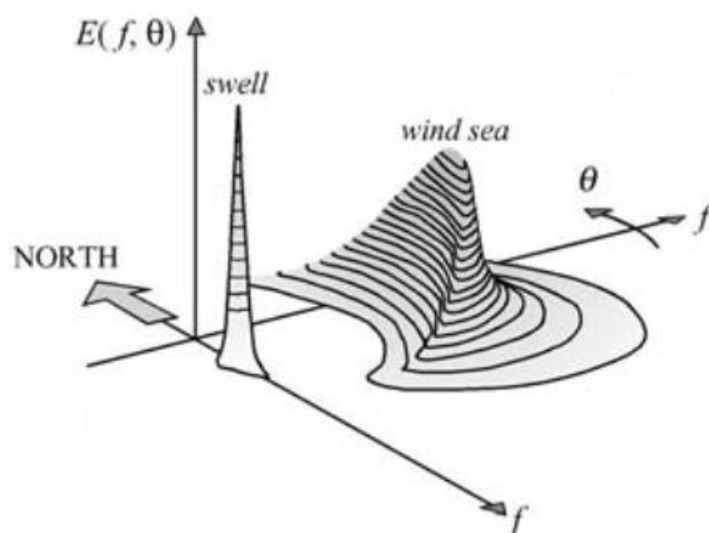


Figura 2: Ejemplo de representación del espectro de energía del oleaje según su dirección, donde se puede observar la distinción entre mar de fondo (swell) y mar de viento (wind sea) (extraída de Holthuijsen, 2007).

Mediante esta transformación al dominio frecuencial surge entonces de una manera natural la posibilidad de definir el siguiente parámetro:

- Periodo de Pico (T_p): Indica el Periodo del oleaje asociado al mayor contenido energético (el máximo de la gráfica en el dominio frecuencial).

2.1.1 Convención sobre viento y oleaje

Tradicionalmente en este ámbito de estudio se utiliza la siguiente convención, denominada Náutica, en la cual se define la dirección desde donde vienen las olas o el viento, que se mide en sentido horario a partir del Norte geográfico.

Viento u olas desde el NORTE	0°
Viento u olas desde el ESTE	90°
Viento u olas desde el SUR	180°
Viento u olas desde el OESTE	270°

Tabla 1: Convención sobre la dirección y sentido del viento y oleaje

Esta convención, que se muestra en la tabla anterior, es la que se adoptará dentro de esta Tesina.

2.2 MODELOS DE GENERACIÓN DE OLEAJE: EL MODELO SWAN

A lo largo del tiempo se han propuesto diversas teorías sobre todos los fenómenos que intervienen en la generación y la propagación del oleaje. Todo este conocimiento acumulado se ha ido implementando en modelos que pueden ser resueltos con la ayuda de ordenadores para abordar problemas reales. Sin una potencia de cálculo suficiente solo sería posible resolver problemas en condiciones idealizadas y con grandes simplificaciones. No obstante, existen diferentes enfoques según el problema a abordar:

- *Phase Resolving Models*: Llegan a predecir la amplitud y la fase de cada ola. Este método solo es de aplicación en dominios muy pequeños (ejemplo: SWASH).
- *Phase Averaging Models*: Predicen la evolución temporal y espacial del espectro direccional. Obtenemos una solución en el sentido estadístico pero son mucho menos costosos computacionalmente. Son los que se utilizan habitualmente para los modelos de predicción (ejemplos: WAVEWATCH, WAM, SWAN).

Entre estos últimos, los modelos existentes distinguen entre los pertenecientes a la primera, segunda o a la tercera generación. En los modelos de tercera generación, el espectro de oleaje es calculado por la integración de la ecuación de balance de energía sin restricciones en la evolución del espectro, no limitándose a ninguna forma paramétrica. Estos modelos de generación de oleaje predicen la forma espectral a partir de las fluctuaciones de presión y variaciones de la fricción sobre la superficie del mar provocado por el flujo de aire sobre las olas.

2.2.1 ¿Por qué SWAN?

Existen varios procesos que afectan a la evolución del oleaje según el proceso estudiado, tal como se puede observar en la siguiente tabla (Battjes, 1994):

Proceso	Aguas Oceánicas	Plataforma oceánica	Costa	Puerto
Generación por Viento	●●●	●●●	●	○
Interacción por Cuadrupletes	●●●	●●●	●	○
White-capping	●●●	●●●	●	○
Fricción de fondo	○	●●	●●	○
Refracción de la corriente	○/●	●	●●	○
Refracción de fondo /shoaling	○	●●	●●●	●●
Rotura	○	●	●●●	●
Interacción por Triadas	○	○	●●	●
Reflexión	○	○	●/●●	●●●
Difracción	○	○	●	●●●
●●●= dominante ●●=significante pero no dominante ●=de poca importancia ○=despreciable				

Tabla 2: Importancia relativa de varios procesos que afectan a la evolución de las olas en aguas costeras y oceánicas (extraída de Battjes, 1994)

Por tanto tendremos que escoger un modelo acorde con nuestro estudio (la Costa Catalana), donde el efecto de fondo es significativo, y en el que se integren todos los procesos que son relevantes a nuestra escala. Es por esta razón que se ha elegido el modelo SWAN para realizar las simulaciones de oleaje ya que, aunque puede ser aplicado a cualquier escala, esta específicamente diseñado para aplicaciones costeras (Booij et al, 1999) (Ris et al, 1999).

2.2.2 Descripción del modelo SWAN

SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*), desarrollado por la Universidad Técnica de Delft (Holanda), es un modelo de propagación del oleaje que goza de una amplia difusión entre la comunidad científica, y ha sido validado por un gran número de estudios y es utilizado por multitud de instituciones. Tiene como ventaja que es un software *Open Source* y de descarga gratuita, aunque como contrapartida carece de una interfaz de usuario amigable.

Es un modelo de tercera generación que describe la evolución del espectro de energía del oleaje tomando en cuenta los datos del viento, corrientes y batimetría. SWAN incluye la posibilidad de considerar una gran cantidad de los procesos a los que se ve sometido el oleaje durante su propagación calculando procesos de generación, disipación e interacciones no lineales.

2.2.3 La ecuación (espectral) del balance de la acción

SWAN está basado en la aplicación de la ecuación espectral del balance de la acción $N = N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$, donde E es la densidad de energía y σ la frecuencia relativa. Se escoge la acción N porque tiene la propiedad de conservarse en presencia de corrientes (la energía que sería una magnitud más intuitiva no lo hace):

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(c_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(c_z N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(c_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad [\text{Ec. 3}]$$

Donde las variables que aparecen son: θ dirección de propagación, σ frecuencia relativa y c_g velocidad de grupo (para cada dirección). La integración de esta ecuación sobre una malla de cálculo se implementa en diferencias finitas en 5 dimensiones (tiempo, espacio y espacio espectral).

En la parte izquierda de esta ecuación el primer término representa el cambio local de N en el tiempo, el segundo y el tercer términos modelan el asomeramiento (*shoaling*) producido por el fondo marino, mientras que el cuarto término describe los cambios de la frecuencia relativa debido a las corrientes, mientras que el quinto término simboliza la refracción y difracción.

Por otro lado el término $S = S(\sigma, \theta)$ de la parte derecha de la ecuación anterior es el término fuente en términos de densidad de energía, que representa los efectos de generación, disipación e interacciones no lineales entre olas:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \quad [\text{Ec. 4}]$$

Donde los términos anteriores corresponden a:

- S_{in} : transferencia de energía del viento a las olas
- S_{nl} : interacciones entre olas no lineales (tríadas y cuádrupletes)
- S_{ds} : disipación (fricción con el fondo, rotura y *whitecapping*)

Que se describen con más detalle a continuación:

Interacciones no lineales entre olas: En aguas profundas los grupos de cuatro olas pueden intercambiar energía cuando se cumplen ciertas condiciones de resonancia, lo que modifica el espectro del oleaje. Este efecto se denomina interacción entre cuádrupletes. Al ser un término no lineal es muy costoso computacionalmente por lo que se calcula mediante una aproximación (DIA: *Discrete Interaction Approximation*).

En aguas someras, las interacciones entre tríadas son relevantes, que en el modelo provocan una transferencia de energía hacia las altas frecuencias.

Disipación: Integra los términos correspondientes a tres causas diferentes:

- Fricción con el fondo: Se puede modelar la pérdida de energía mediante diferentes modelos, aunque dada la variabilidad en las características del los fondos marinos SWAN implementa versiones simples de estos modelos.
- Rotura: La disminución de la profundidad provoca un aumento de la altura del oleaje. Si esta altura se vuelve demasiado grande, las olas rompen y se produce una gran disipación de energía. Este efecto es muy relevante en aguas someras y existen diferentes modelizaciones.
- *Whitecapping* (o decrestamiento): Provoca una pérdida de energía en aguas profundas por rotura de las olas. La formulación está basada en el modelo de pulsos de Hasselmann (Hasselmann, 1974)

Generación por viento: La transferencia de energía del viento a las olas provoca un incremento de la amplitud del oleaje. Se considera que actúan dos mecanismos, el primero es la fuerza de resonancia por fluctuaciones turbulentas de la presión, que causa un crecimiento lineal. El segundo es la interacción resonante entre olas, que causa un crecimiento exponencial. A continuación se entra más en detalle en este apartado por su relevancia específica en la presenta tesina.

Con base a los mecanismos anteriores el crecimiento del oleaje se modela a partir de la siguiente expresión (Holthuijsen, 2007):

$$S_{in} = A + B \cdot E(\sigma, \theta) \quad [\text{Ec. 5}]$$

El parámetro A describe el crecimiento lineal, debido al mecanismo resonante de Philips (Phillips, 1957). El parámetro A se calcula en función de velocidad de fricción (u_x) y de la dirección relativa del viento con respecto al oleaje a partir de una expresión empírica (Cavaleri y Rizzoli, 1981). Además, se fija una frecuencia umbral (frecuencia de Pierson–Moskowitz) por debajo de la cual la excitación no produce oleaje.

Este mecanismo lineal es más importante al principio, pero cuando ya existe alguna energía en el oleaje, el término exponencial regulado por el parámetro B domina. Este segundo

mecanismo se conoce como mecanismo de retroalimentación de Miles (Miles, 1957). Según Miles la presión del aire en la superficie del agua alcanza un máximo en la zona de atrás de la cresta de la ola y un mínimo en la zona de delante. Esto provoca que el viento “empuje” al agua donde está bajando y que la “estire” donde se está elevando. Este acoplamiento produce una transferencia de energía del viento a las olas tal como se puede ver en la figura siguiente (Holthuijsen, 2007).

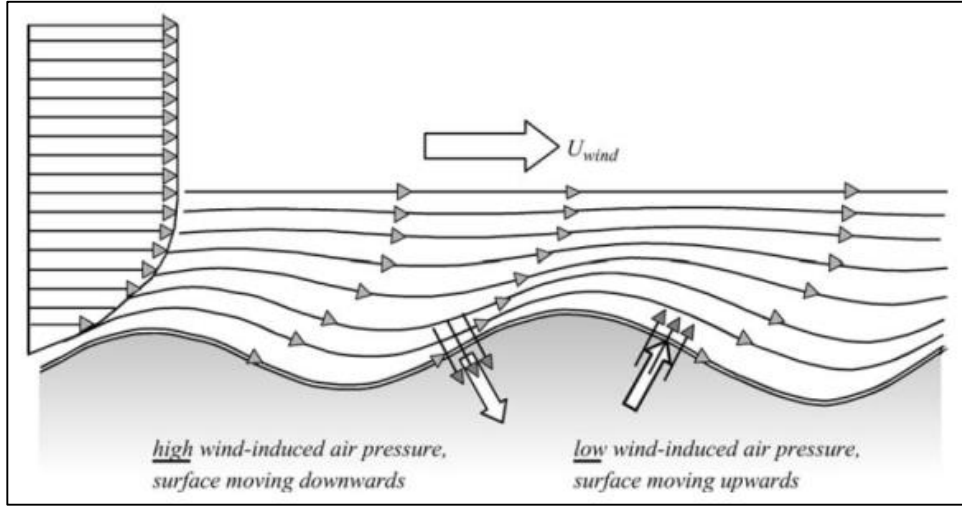


Figura 3: Variación de la presión del viento sobre una ola. Extraída de Holthuijsen, 2007.

En SWAN existen varias implementaciones (Delft University of Technology, 2015) de la expresión correspondiente a B , siendo la más moderna de ellas debida a Janssen (Janssen, 1991), y tiene en cuenta explícitamente la interacción entre el viento y las olas considerando los efectos de contorno atmosféricos y la rugosidad efectiva de la superficie del mar.

$$B = \beta \frac{\rho_{air}}{\rho_{water}} \cdot \left(\frac{u_*}{c_{phase}} \right)^2 \cdot \max[0, \cos(\theta - \theta_w)]^2 \sigma \quad [\text{Ec. 6}]$$

Donde β (constante de Miles) es un coeficiente que se determina a partir de otras expresiones donde intervienen la rugosidad efectiva, la velocidad de fricción y el ángulo relativo del viento.

La implementación alternativa (usada en la Tesina) es debida a Komen (Komen et al., 1984) y Snyder (Snyder et al., 1981):

$$B = \max \left[0, 0.25 \frac{\rho_{air}}{\rho_{water}} \cdot \left(28 \frac{u_*}{c_{phase}} \right)^2 \cos(\theta - \theta_w) - 1 \right] \sigma \quad [\text{Ec. 7}]$$

Dada la expresión anterior vemos que el mecanismo actúa cuando existe velocidad de fricción, es decir, cuando la velocidad del viento (u_*) es mayor que la velocidad de propagación de las ondas (c_{phase}).

SWAN admite como entrada el campo de viento a 10 metros de altura pero internamente para la expresión de Komen utiliza la velocidad de fricción como $u_*^2 = C_D U_{10}^2$, donde C_D es el coeficiente de drag.

Dada la expresión anterior vemos que el mecanismo actúa cuando existe velocidad de fricción, es decir, cuando la velocidad del viento es mayor que la de las olas.

2.2.4 Esquemas numéricos

Para resolver la ecuación de balance de acción de oleaje SWAN permite elegir entre tres esquemas numéricos: BSBT (*Backward Space Backward Time*) que es un esquema de primer orden, SORDRUP que es de segundo orden y se utiliza en casos estacionarios y por último el esquema S&L (Stelling and Leendertse) que también es de segundo orden y se aplica a casos no estacionarios.

En esta Tesina se ha utilizado el esquema BSBT que se caracteriza por ser muy robusto pero como contrapartida es muy difusivo para tiempos de cálculos grandes, lo que penaliza la calidad de los resultados. La difusión numérica está causada por grandes gradientes de la acción de oleaje en el dominio (por ejemplo debidos a las corrientes o la refracción por la batimetría).

2.3. PREDICCIÓN MEDIANTE TÉCNICAS DE CONJUNTOS

Tal y como se ha visto en el apartado anterior los modelos predicción del oleaje necesitan alimentarse a su entrada mediante campos de vientos para cada instante de integración. Por consiguiente, si se quiere obtener una buena predicción del oleaje es necesario disponer de campos de vientos tengan una alta fidelidad con respecto a las condiciones reales de la atmósfera. Dado que estos campos de viento son a su vez generados por predicciones a partir de modelos atmosféricos, la calidad de la predicción del oleaje será función de la calidad de la predicción meteorológica.

Los modelos atmosféricos permiten simular la evolución de la atmósfera mediante la implementación numérica de las ecuaciones de la mecánica de fluidos y la termodinámica. Debido a la complejidad de estas ecuaciones no fue hasta la década de 1950 que con la aparición de los primeros ordenadores fue posible realizar las primeras predicciones a partir de modelos de una manera operativa. En la actualidad uno de los primeros modelos más extendidos y antiguos es el GFS (*Global Forecast System*) que fue implementado en 1981 como modelo de predicción global de los centros de predicción meteorológica (NCEP) de los Estados Unidos. Otro modelo de referencia es el IFS (*Integrated Forecast System*) del Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (ECMWF).

Pero, incluso con la creciente potencia de cálculo de los actuales supercomputadores, la fiabilidad del pronóstico de los modelos numéricos del tiempo se extiende cómo máximo a unos seis días. Este hecho se debe a que las predicciones deterministas tienen unas limitaciones inherentes, que ya fueron señaladas a principios de los años 60 del siglo pasado por Edward Lorenz, pionero de la Teoría del Caos (Lorenz, 1963).

2.3.1 Limitaciones en la Predicciones Deterministas

Aunque se puede obtener una predicción determinista, ésta siempre contiene errores y **nunca** puede proporcionar una predicción perfecta por varias razones (NOAA, 2006):

1. Ecuaciones del modelo no captan plenamente todos los procesos: Algunas ecuaciones son altamente no lineales lo que implica un alto costo computacional, por lo cual no sería posible disponer de la predicción rápidamente para generar avisos. Por tanto algunos de los términos más complejos de las ecuaciones se simplifican.
2. Resolución del modelo: Un modelo no puede resolver los procesos atmosféricos y las características más pequeñas que ciertos umbrales: El modelo pierde cualquier cambio que ocurren entre los puntos del mallado. Con el tiempo este tipo de errores pueden acumularse y convertirse en la señal dominante en la salida del modelo.
3. Condiciones iniciales en cada punto no disponibles: No existe una red de observación que abarque todos los puntos. Por tanto se estiman las condiciones entre los sitios de observación.
4. Precisión y calidad de los datos iniciales: La inexactitud en los datos iniciales en última instancia conduce a errores que crecen en magnitud y pueden dominar la salida del modelo (el llamado efecto Mariposa). Por tanto los datos de observación utilizados por un modelo deben tener una precisión infinita como un requisito previo para producir un pronóstico perfecto.

2.3.2 Introducción a la Predicción por Técnicas de Conjuntos

La solución para tener en cuenta el efecto de los errores en las condiciones iniciales de un modelo es generar no sólo un único pronóstico, sino un conjunto de predicciones (idealmente una distribución completa de los posibles estados de las predicciones) a partir de una distribución de posibles estados iniciales, que se crean perturbando las condiciones iniciales (Du, 2007). En este método siempre existe una predicción no perturbada a la que se denomina control.

La Técnica de Predicción por Conjuntos (*Ensemble Prediction System-EPS*) fue desarrollada principalmente a partir de los trabajos de Tracton y Kalnay en 1993, y Toth y Kalnay en 1993. Esta técnica se basa en la naturaleza caótica de la atmósfera y en la disponibilidad de una gran capacidad de cómputo en paralelo en los centros de cálculo para utilizar modelos capaces de estimar la probabilidad de que se produzcan determinados eventos meteorológicos, tanto a corto plazo (menos de 60 horas) como a medio plazo (de 3 a 15 días). Actualmente tanto el modelo GFS (Americano) como el IGS (Europeo) generan un conjunto de predicciones. No todas las predicciones se ponen a disposición del público y la resolución espacial cambia en función del horizonte de predicción, pero internamente IGS es capaz de generar conjuntos de 51 miembros a 15 días, mientras que GFS utiliza 22 miembros a 16 días.

La idea conceptual del método se representa en la figura siguiente. En ella se observa como en el instante de tiempo inicial ($t=0$) una variable tiene un valor representado por una función densidad de probabilidad que al evolucionar en el tiempo ($t=T$) da lugar a una nueva

distribución. En una predicción determinista, que estaría representada por la línea roja gruesa, de un único valor en el estado inicial solo se obtendría un único valor al evolucionar en el tiempo.

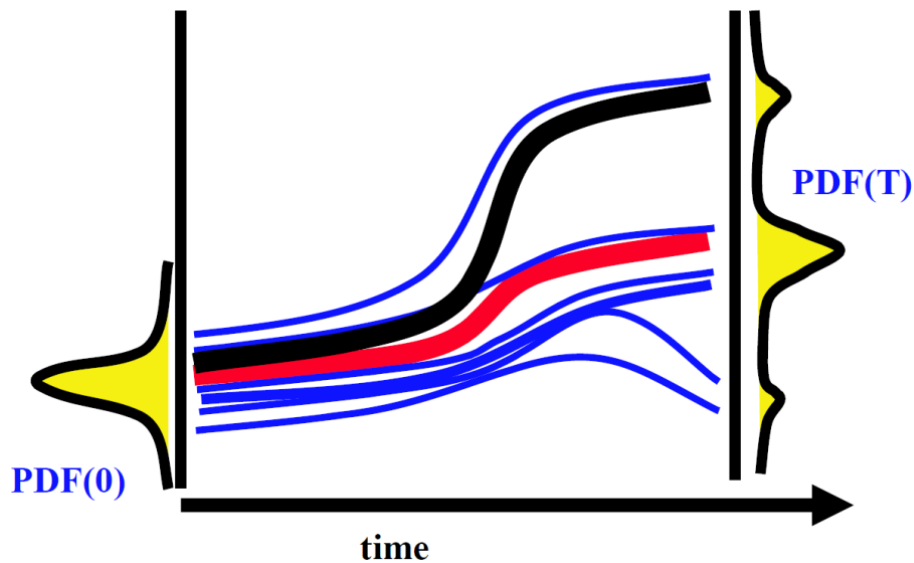


Figura 4: Esquema conceptual de la Predicción por Técnicas de Conjuntos. Extraída de Buizza 2012.

Como se observa en la figura las técnicas de predicción por conjuntos no son solo una herramienta para mejorar la predicción sino que además lo son para cuantificar la incertidumbre en la predicción. De esta manera es posible obtener información acerca del nivel de incertidumbre, la predicción más probable y las probabilidades de dichos resultados.

En este método cada predicción (*forecast*) es llamada miembro (*member*) de un conjunto (*ensemble*) de predicciones. Algunas perturbaciones quedan amortiguadas en las primeras horas de la previsión y nunca darán lugar a una solución diferente en comparación con el miembro de control (línea roja). Idealmente la salida producirá una diferencia significativa en soluciones cuya distribución del pronóstico coincide con la frecuencia real de ocurrencia.

Los miembros del conjunto diferirán unos de otros dependiendo del método elegido para generar los miembros del conjunto. El número de miembros perturbados en el conjunto suele ser una función de los recursos computacionales disponibles. Para ser útiles las perturbaciones deben conducir a un conjunto de soluciones que presenten una varianza que sea suficientemente realista.

Por tanto, en resumen, las técnicas de predicción por conjuntos nos permiten:

- establecer un conjunto de resultados posibles del pronóstico,
- estimar la probabilidad para cualquier miembro
- determinar el resultado de miembro más probable.

2.3.3 Construcción de los Conjuntos (ensembles)

Por tanto la elección de los miembros del conjunto es un aspecto fundamental del funcionamiento de este sistema de predicción. El principal problema es cómo estimar la incertidumbre en las condiciones iniciales, por lo que el objetivo es describir todas las posibles fuentes de incertidumbre del modelo de la forma más precisa y completa posible, y luego incorporar todas esas incertidumbres (términos de perturbación) en el modelo numérico para generar un conjunto de pronósticos. Este conjunto de tamaño finito (que es una aproximación a un conjunto teóricamente infinito) se utiliza como base para estimar la distribución probabilística y la incertidumbre de un pronóstico.

A continuación se muestra un breve resumen de los enfoques existentes en la actualidad (Du, 2007). Sobre la base de los enfoques utilizados, las Técnicas de Predicción por Conjuntos se podrían clasificar en tres categorías generales: 1-dimensional, de 2 dimensiones y sistemas de 3 dimensiones.

En los enfoques 1-Dimensionales solo se considera incertidumbre en las condiciones iniciales al perturbar el modelo. Para generar las perturbaciones se demandan tres propiedades básicas:

- Realismo: implica que la magnitud de la perturbación tiene que estar dentro de un tamaño de error.
- Divergencia: la perturbación tiene que tener un crecimiento dinámico tal que los miembros tiendan a divergir tanto como sea posible durante la integración del modelo para cubrir todas las soluciones posibles.
- Ortogonalidad: las perturbaciones de cada miembro del conjunto tienen que ser ortogonales entre sí para maximizar el contenido de la información contenida en un conjunto (especialmente importante para conjuntos de pequeño tamaño).

Existen varios métodos utilizados para generar estas perturbaciones: Perturbación Aleatoria, *Time Lagged*, Vectores Singulares, Ciclo de Incubación (*breeding*) y Acoplamiento con asimilación de datos. A continuación explicaremos brevemente la idea del funcionamiento de la Perturbación Aleatoria que es el método más primitivo y el Ciclo de Incubación, que es usado por el modelo Americano (GFS), puesto que en esta Tesina se han utilizado sus ensembles. El modelo Europeo (IFS) utiliza el método de Vectores Singulares; para más información se remite al lector a (Du, 2007).

Los métodos de Vectores Singulares y de Ciclo de Incubación devuelven resultados más o menos equivalentes (algo mejores en los Vectores Singulares). La ventaja del ciclo de incubación es que es un método relativamente más barato de mantener y ejecutar y que además tiene en cuenta los procesos no lineales del modelo al determinar las perturbaciones.

Perturbación Aleatoria (enfoque Monte Carlo):

En este método la perturbación se genera aleatoriamente a partir de algún tipo de distribución (generalmente una distribución normal) que representa la incertidumbre típica. A pesar de que este tipo de perturbación representa bien la magnitud promedio de la incertidumbre (realismo) la tasa de crecimiento de la perturbación es baja, y como consecuencia la

divergencia en la solución entre los miembros generalmente es pequeña. Por tanto es un método poco eficiente (los miembros se parecen demasiado entre sí) y únicamente se aplica cuando no sé está seguro de que otros métodos funcionan.

Ciclo de Incubación (ó *Breeding*):

El nombre "ciclo de incubación" se deriva del funcionamiento del método, que "incuba" o genera las perturbaciones de las condiciones iniciales que proporcionan los mejores pronósticos por conjuntos. Los ciclos de incubación para generar perturbaciones en las condiciones iniciales se fundamentan en la suposición de que los aspectos más importantes de la incertidumbre en las condiciones iniciales se desarrollarán y se volverán dominantes muy tempranamente y que continuarán siendo importantes en el intervalo de interés del pronóstico.

Para iniciar un ciclo de incubación los pasos son los siguientes:

1. Se añaden perturbaciones aleatorias (también se utilizan salidas de otros métodos) a las condiciones iniciales de análisis del modelo.
2. Se genera un pronóstico de control y uno perturbado para un plazo de pronóstico corto (generalmente de 24 a 48 horas).
3. Los pronósticos de control y perturbado se restan para obtener la perturbación en la predicción.
4. La perturbación obtenida se normaliza o reescala a un tamaño que refleje las incertidumbres en las observaciones.

Estas nuevas perturbaciones ajustadas se introducen a continuación en un nuevo análisis para el siguiente período de pronóstico y el ciclo "de incubación" se repite (ver Figura donde se muestra cómo se determina una única perturbación en el ciclo de incubación).

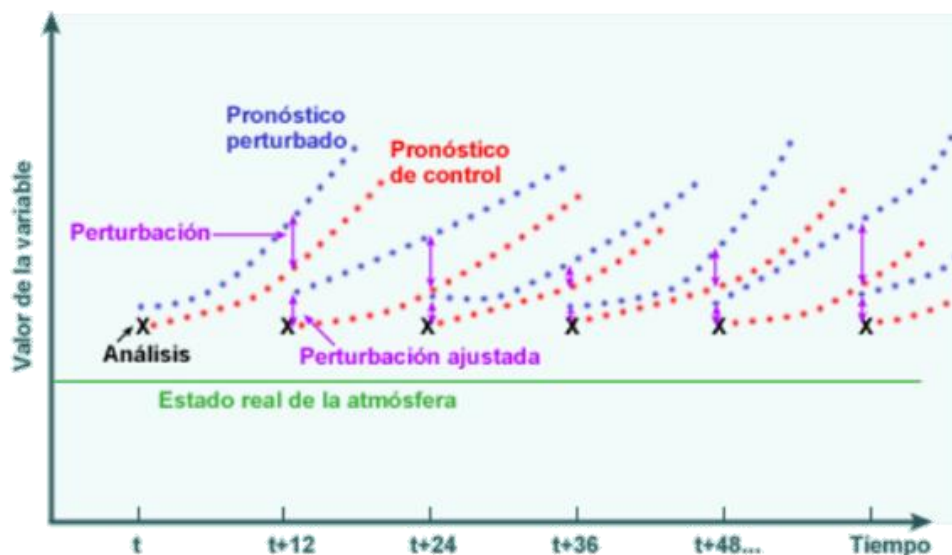


Figura 5: Funcionamiento de un ciclo de incubación de una perturbación. Figura extraída de University Corporation for Atmospheric Research, 2006.

Si este ciclo se repite durante algunos días, las diferencias entre el control y el pronóstico acaban estabilizándose y de este modo se incuba una perturbación. Después la perturbación se suma y se resta del control para crear un par "incubado" de perturbaciones de condiciones iniciales. Se utilizan pares incubados para que las condiciones iniciales continúen centradas en las condiciones iniciales de control, que se consideran a priori como el mejor análisis posible. En un sistema de predicción por conjuntos (SPC), el número de pares incubados dependerá de la capacidad computacional disponible.

Por ejemplo la configuración del SPC de mediano plazo del NCEP en 2004 utilizaba cinco ciclos de incubación para crear 10 perturbaciones (5 positivas y 5 negativas). Los ciclos se realizaban cada 6 horas y las diferencias entre el control y la perturbación se calculaban cada 24 horas de pronóstico y se ajustaban al tamaño del error.

Finalmente en el enfoque 2-Dimensional también se considera la incertidumbre en la física y la dinámica del modelo. Estrategias sencillas para crear estos ensembles son variar la física del modelo o alternativamente utilizar resultados de modelos diferentes. En el enfoque 3-Dimensional se tiene en cuenta la historia pasada además de variar las condiciones iniciales y el modelo. Un ejemplo es Direct Time-Lagged ensemble.

3. FUENTES DE DATOS

En la elaboración de esta tesina se han utilizado fuentes de datos de diversa procedencia. A continuación se detalla el origen y las características de estos datos.

3.1 DATOS DE BATIMETRÍA

Conforme el oleaje se aproxima y propaga hacia la costa, experimenta los efectos de la fricción con el fondo: refracción, difracción, asomeramiento y disipación de energía. Por lo tanto la batimetría del fondo marino es un dato que tiene que ser incorporado en un modelo de generación de oleaje.

La Carta Batimétrica General de los Océanos o *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO) («GEBCO») es una batimetría de acceso abierto, que se ha convertido en referencia para investigadores de todo el mundo.

GEBCO procesa la información de sondeos de buques de investigación e instituciones oceanográficas locales, junto con datos de altimetría satelital y otras fuentes, para elaborar un atlas digital del fondo marino.

En este estudio se disponía de la batimetría del Mediterráneo Occidental de GEBCO con una resolución del mallado de 30 segundos de arco ó 0.00833° (que corresponde aproximadamente a 700 metros en longitud x 900 metros en latitud en la zona geográfica de nuestro estudio). Estos datos se proporcionan en un fichero en formato, el cual se puede convertir en ASCII y abrirlo por ejemplo, con el software Matlab.

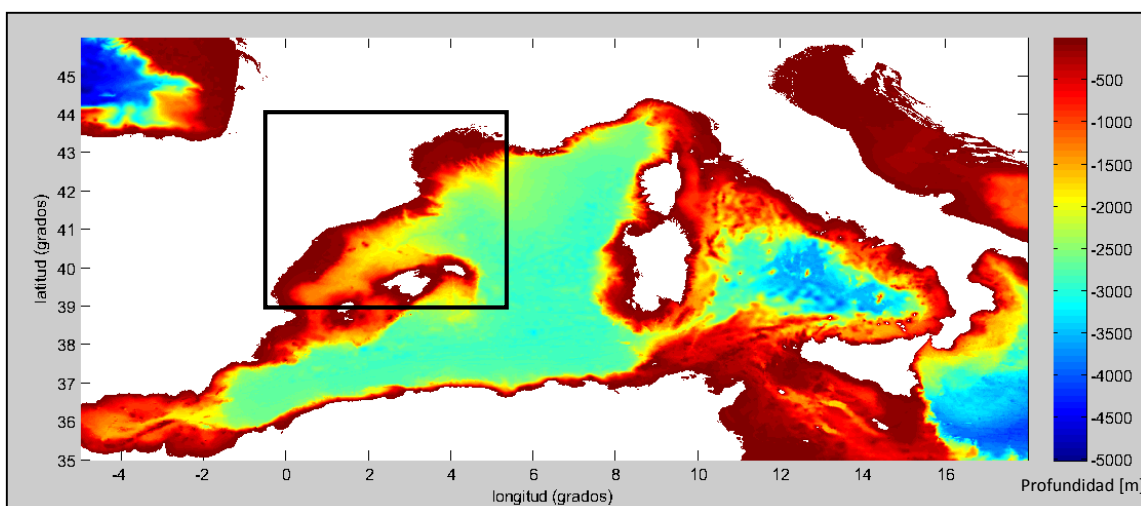


Figura 6: Batimetría del Mediterráneo Occidental y área de estudio.

En la figura anterior se observa que el fondo del mar en la zona de la Costa Catalana presenta una plataforma continental bastante estrecha (generalmente de menos de 20 km de ancho) en la que existen numerosos cañones submarinos.

3.2 DATOS DE OLEAJE DE BOYAS (PARA VALIDACIÓN DE RESULTADOS)

Para evaluar el desempeño del método propuesto en esta tesina será necesario contrastar las predicciones con medidas reales del oleaje. Con este fin se solicitó información a Puertos del Estado («Puertos del Estado»), que dispone de un banco de datos oceanográficos destinado al uso en proyectos de investigación y es facilitado de manera gratuita.

3.2.1 Descripción de las redes de boyas de Puertos del Estado

Puertos del Estado dispone de medidas instrumentales del oleaje de las boyas pertenecientes a las dos redes que mantiene (Puertos del Estado):

- REDCOS: Las boyas de la Red de Boyas Costeras se caracterizan por estar ubicadas cerca de instalaciones portuarias, estando fondeadas a menos de 100 metros de profundidad. Generalmente las medidas realizadas por estas boyas están perturbadas por el perfil de costa y por los efectos del fondo sobre el oleaje y la información que suministran solo es representativa de las condiciones locales.
- REDEXT: Medidas procedentes de la Red de Boyas de Aguas Profundas (Red Exterior), caracterizadas por estar fondeadas lejos de la línea de costa y a gran profundidad (más de 200 metros). Por tanto, las medidas de estos sensores no están perturbadas por efectos costeros y son representativos de mar abierto.

En la siguiente figura se representa el esquema de una boya modelo Triaxys de la REDCOS (Puertos del Estado, 2012a) y una boya modelo SeaWatch perteneciente a la REDEXT (Puertos del Estado, 2012b)

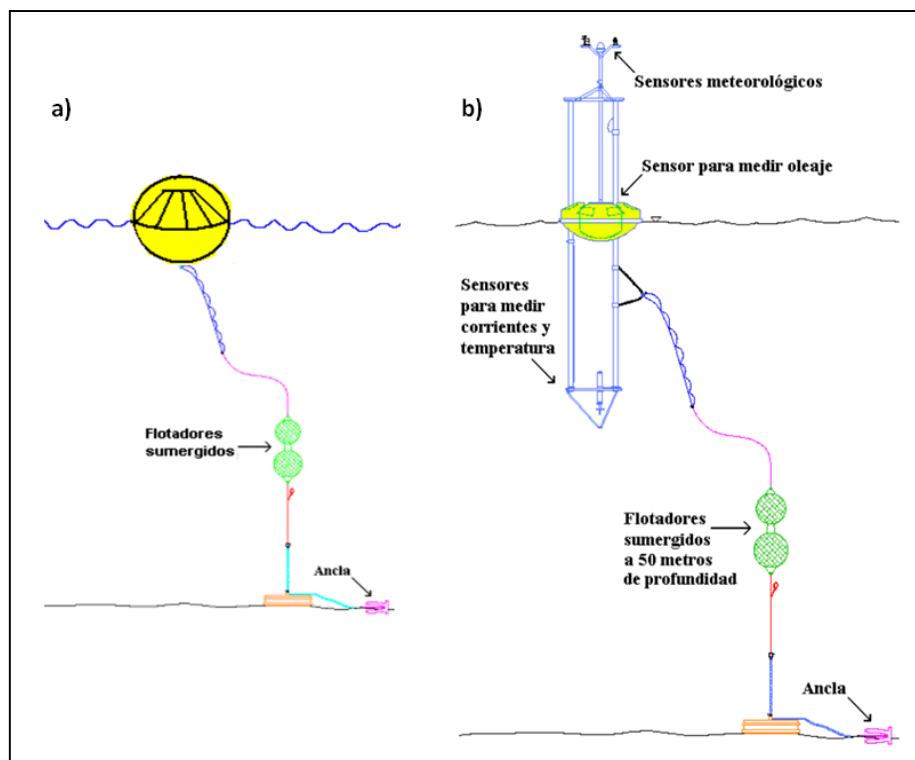


Figura 7: Esquema del tipo de fondeo de una boya a) Triaxys (REDCOS) y b) SeaWatch (REDEXT). Figuras extraídas de (Puertos del Estado, 2012a) y (Puertos del Estado, 2012b)

Estas boyas incorporan diversos sensores (según el modelo) y pueden llegar a medir tanto el oleaje como parámetros atmosféricos y oceanográficos. El funcionamiento de estas boyas es el siguiente. Cada hora estos aparatos realizan medidas de una serie de elevaciones instantáneas de la superficie del mar alrededor del nivel medio durante un intervalo de tiempo mínimo (por ejemplo 20 minutos, el intervalo depende del tipo de boya). La muestra se considera representativa del oleaje en ese tiempo.

A continuación, a partir de esta serie temporal se obtienen los parámetros representativos del oleaje (H_s , T_m , T_p , etc) para esa hora (aplicando los análisis estándares de cruce por cero y espectral), que permiten obtener los parámetros más representativos del oleaje. Lo más habitual es que todo este proceso se realice a bordo de la boya, transmitiéndose los resultados a tierra en tiempo real.

Por otra parte, cada cierto tiempo se recogen los datos brutos de oleaje, que se procesan en tierra, a los cuales se les aplica un control de calidad que permite asignar a cada dato de oleaje un nivel de calidad o fiabilidad. Este proceso además tiene la ventaja de que los parámetros de oleaje se recalculan de manera que no dependen de los algoritmos específicos de cada boya. Son estos datos reprocesados en las instalaciones de Puertos del Estado los que se almacenan de modo definitivo en el Banco de Datos Oceanográficos.

En la figura siguiente se presenta a modo de ejemplo el esquema global de los procesos explicados anteriormente para una boya modelo Triaxys (el proceso es similar en otros modelos):

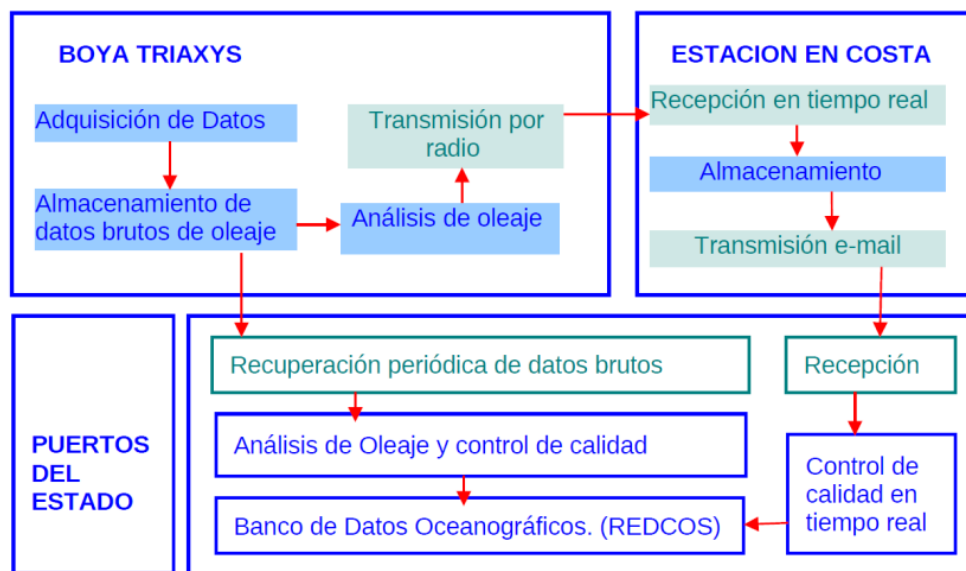


Figura 8: Generación, transmisión, proceso y almacenamiento en las boyas Triaxys (Puertos del Estado)

Estas boyas proporcionan una diversidad de datos (oleaje, vientos, corrientes) referenciados al Tiempo Universal (UTC) de los cuales únicamente la altura de ola significativa y el período medio serán utilizados en esta tesina. A veces los registros presentan huecos, debido a fallos (fallo en la transmisión, choque con objetos flotantes, desprendimiento de los anclajes, etc.).

3.2.2 Boyas utilizadas en este estudio

En esta tesina se utilizarán los datos instrumentales de las boyas posicionadas en los puntos listados en la siguiente tabla:

Boya	Longitud	Latitud	Profundidad	Red	Cadencia	Tipo Sensor	Modelo
Tarragona Costa	1.19E	41.07N	15 m	REDCOS	60 minutos	Direccional	Triaxys
Tarragona Exterior	1.47E	40.68N	688 m	REDEXT	60 minutos	Direc Met-Oce	SeaWatch
Barcelona Costa	2.20E	41.32N	68 m	REDCOS	60 minutos	Direccional	Triaxys
Cap Begur	3.65E	41.92N	1200 m	REDEXT	60 minutos	Direc Met-Oce	WaveScan
Dragonera	2.10E	39.56N	135 m	REDEXT	60 minutos	DirecMet-Oce	WaveScan

Tabla 3: Posición y características de las boyas.

En la siguiente figura se puede observar la ubicación de las boyas anteriores en el mapa:

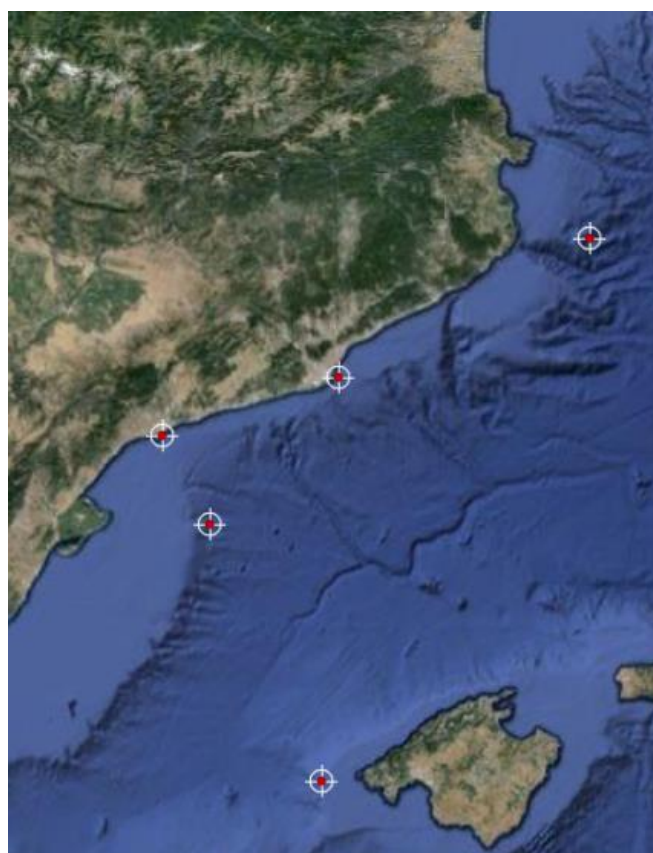


Figura 9: Situación de las boyas en el área de estudio (captura imagen web Puertos del Estado)

Los registros de datos utilizados en esta tesina han sido escogidos con el criterio de que incluyan algún temporal, ya que se espera que en estas situaciones cada miembro del conjunto proporcione una predicción más diferenciada respecto al resto. Además es en situaciones de temporal donde las predicciones son más necesarias y cuando la aplicabilidad de las técnicas de conjunto para predecirlos presenta un mayor valor añadido respecto a las predicciones deterministas. Por esta razón se han escogido los siguientes dos episodios de temporal, que corresponden a las fechas siguientes:

Episodio1: del 23/02/2013 al 09/03/2013:

Estos datos, obtenidos en formato ASCII, corresponden a datos de postproceso que ya habían pasado el control de calidad de Puertos del Estado. Se observa que en este caso los datos de la sonda de Cap Begur eran insuficientes y han sido descartados para la realización de esta tesina. En estas fechas tampoco se disponía de información de la boya de Dragonera. En este episodio se observa que se produjeron tres tormentas consecutivas, en las que se llegaron a alcanzar alturas de ola superiores a 4 metros en las boyas de Barcelona Costa y Tarragona Exterior.

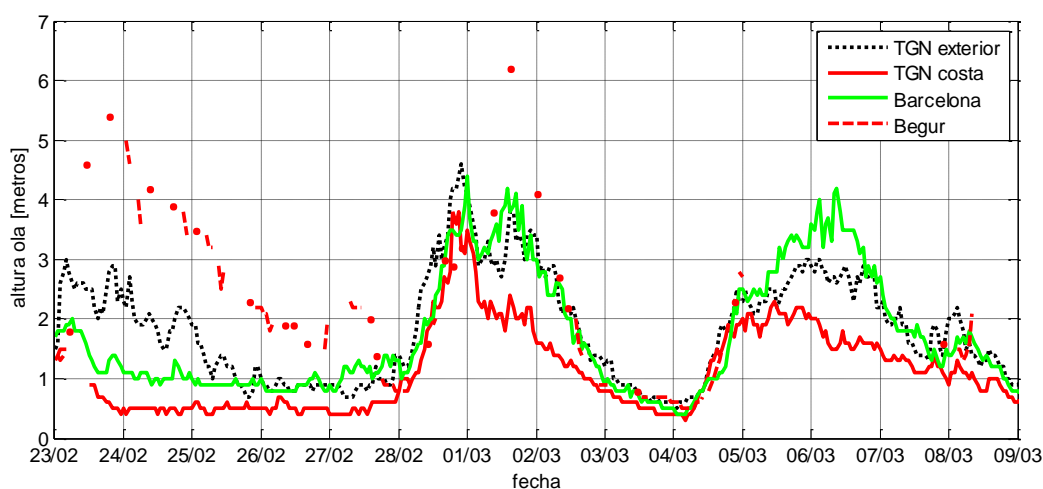


Figura 10: Registros de boyas del primer periodo de estudio (23/02/2013 al 09/03/2013)

Episodio 2: del 21/01/2015 al 04/02/2015:

En este caso la procedencia de los datos corresponde a los transmitidos en tiempo real debido a que todavía no estaban disponibles los datos de postproceso ya que en el momento de la elaboración de esta Tesina eran datos de fecha muy reciente. Por tanto su calidad puede ser menor que en los datos del primer episodio del 2013, que ya han pasado un postproceso, pero como contrapartida se disponía de los datos de dos boyas adicionales (Begur y Dragonera). Consta de varios archivos en formato ASCII con los registros con una frecuencia de 1 hora.

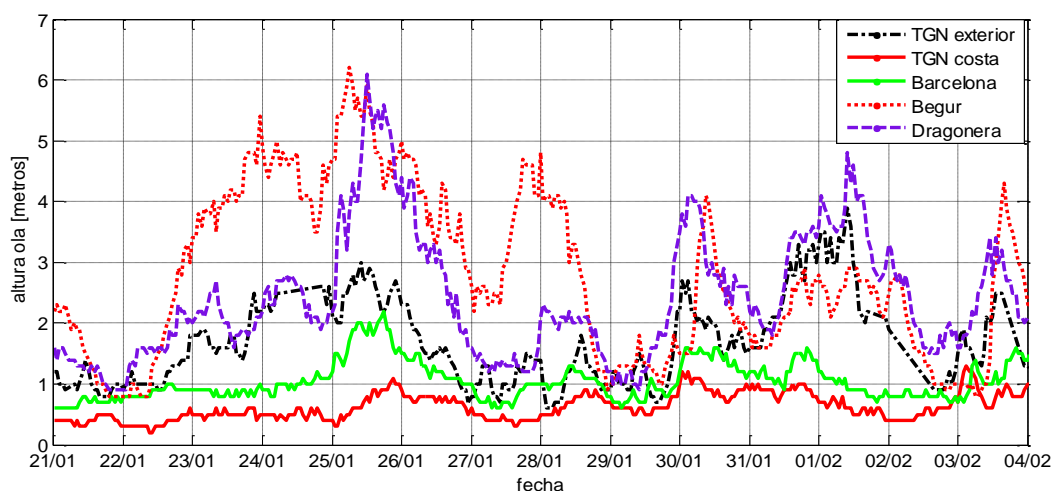


Figura 11: Registros de boyas del segundo periodo de estudio (21/01/2015 al 04/02/2015).

En este episodio se observa que se produjeron varias tormentas consecutivas, en las que se las mayores alturas de ola (hasta 6 metros) se alcanzaron en las boyas de Begur y Dragonera (ambas son boyas exteriores). La boya de Tarragona Exterior alcanzó los 3 metros al final del episodio. Por el contrario la boya de Tarragona Costa apenas sobrepasó el metro en contadas ocasiones y la boya de Barcelona estuvo casi siempre por debajo de los 2 metros. . Estas últimas son las boyas pertenecientes a la REDCOS, y por lo tanto más afectadas por la costa. Esta es la razón por la cual el efecto de la tormenta es menor que en las otras boyas, situadas en mar abierto.

3.3 DATOS DE VIENTO

Los campos de viento se han obtenido a partir de una base de datos de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) de Estados Unidos. Esta agencia tiene en marcha un proyecto llamado ESRL/PSD (*Earth System Research Laboratory/Physical Sciences Division*) 2nd-generation Reforecast Project (NOAA/ESRL, 2015) que ha producido la base de datos *NOAAs 2nd-generation global ensemble reforecast dataset* (Hamill et al., 2013) de pronósticos históricos generados con un modelo numérico.

Este modelo numérico (en su versión 2012), mediante el cual los NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) comenzaron a utilizar el GEFS (*Global Ensemble Forecast System*) para hacer frente a la incertidumbre inherente a las observaciones del tiempo que son utilizadas para inicializar los modelos de predicción meteorológica (National Climatic Data Center, 2015). El GEFS intenta cuantificar la cantidad de incertidumbre en la predicción mediante la generación de un conjunto de pronósticos múltiples, cada uno perturbado a partir de las condiciones iniciales.

3.3.1 Características y formato de la Base de Datos

Esta base de datos generada (Reforecast V2), que proporciona datos de vientos y otras variables de interés meteorológico, consta de un conjunto de 11 miembros de las previsiones, que se genera todos los días (a partir de las condiciones iniciales a las 00 UTC) desde 1984 hasta hoy. La resolución horizontal del GEFS es T254 (unos 50 km) de un total de 8 días, y T190 (unos 70 km) 8-16 días. La base de datos es pública y se puede descargar en formato GRIB2 mediante el siguiente ftp («<ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Projects/Reforecast2>»):.

El estándar GRIB (*Gridded Binary*) fue diseñado y es mantenido por la Organización Meteorológica Mundial. Es un formato de archivo para el almacenamiento y transporte de datos meteorológicos mallados, como la salida de un modelo de predicción meteorológico. Está diseñado para ser auto descriptivo, compacto y multiplataforma (Government of Canada, 2013). Un archivo GRIB contiene uno o más registros de datos. Cada registro comienza con un encabezado, seguido de datos empaquetados en formato binario.

3.3.2 Campos de viento utilizados y resolución

Los campos de viento disponibles son los correspondientes a los miembros (control: c00 y 10 perturbaciones: p01,..., p10) del conjunto además de la media (mean) y la desviación (spread) de este. De todos los registros de las diferentes variables sólo nos interesará el campos de viento horizontal a 10 metros sobre el nivel del mar (componentes u y v del viento).

En nuestro caso los datos descargados corresponden a una malla con una resolución de 1° , que aproximadamente en nuestra latitud equivale a un paso de longitud de 84 km (53 millas) y un paso en latitud de 111 km (69 millas). En la siguiente figura se observa un ejemplo del campo de vientos disponible en nuestra área de estudio.

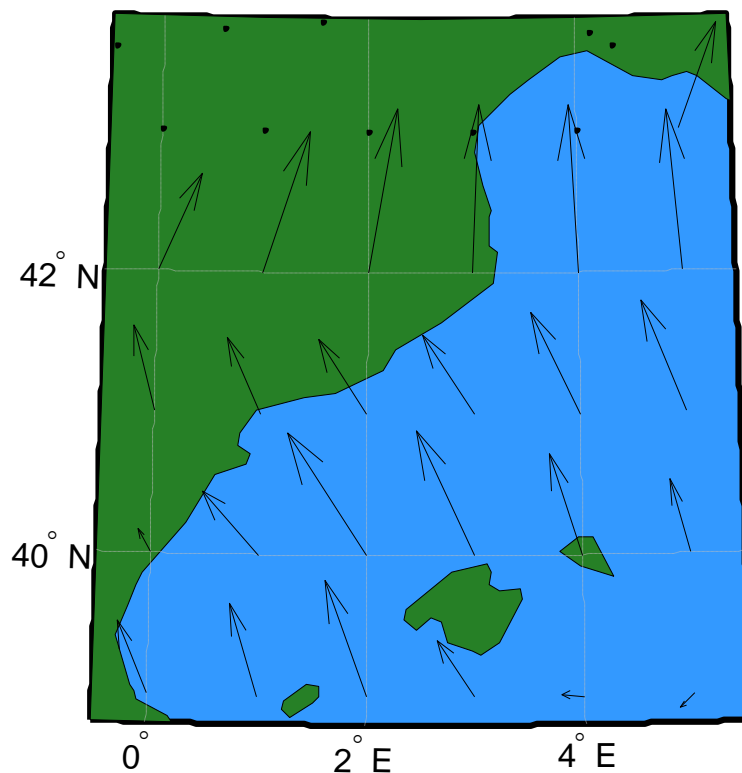


Figura 12: Ejemplo del campo de vientos en el área de estudio (31/01/2015 previsión p01 para las 6 horas)

Tal y como muestra la anterior figura, donde se representa en cada punto los datos disponibles del campo de vientos, la resolución es baja en comparación con el dominio de estudio. Sería deseable trabajar con una mayor resolución del campo de vientos, pero desafortunadamente estos datos no están disponibles.

3.4 VALIDACIÓN DATOS DE VIENTO

Los datos obtenidos del modelo meteorológico (GFS) deben validarse. En este apartado se presentan los resultados que se obtienen al comparar los valores de la velocidad del viento derivados del modelo con las observaciones realizadas por las boyas meteorológicas de Tarragona Exterior y Dragonera.

3.4.1. Diagramas de Taylor

El objetivo es cuantificar cuanto se parece una variable test (f) a una referencia (r). Para ello el Diagrama de Taylor (Taylor, 2001) permite resumir gráficamente y de manera concisa el grado de correspondencia de una variable (f) respecto a otra de referencia (r). En este diagrama es posible representar simultáneamente mediante un solo punto en un espacio bidimensional cuatro indicadores:

- Las desviaciones estándar de las variables (discretas) r y f :

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (r_n - \bar{r}_n)^2} \quad \sigma_f = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f}_n)^2} \quad [\text{Ec. 8 y Ec. 9}]$$

- El coeficiente de correlación (R) entre las dos variables:

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})(r_n - \bar{r})}{\sigma_f \sigma_r} \quad [\text{Ec. 10}]$$

- La diferencia centrada cuadrática (RMS) de una variable (quitamos la media de las variables) respecto la otra:

$$E' = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f}_n - r_n + \bar{r}_n)^2} \quad [\text{Ec. 11}]$$

La clave que explica que un diagrama bidimensional pueda representar simultáneamente 4 variables es que estas están relacionadas por la siguiente relación:

$$E'^2 = \sigma_f^2 + \sigma_r^2 - 2\sigma_f \sigma_r R \quad [\text{Ec. 12}]$$

que es posible identificar con el teorema del coseno según la siguiente figura:

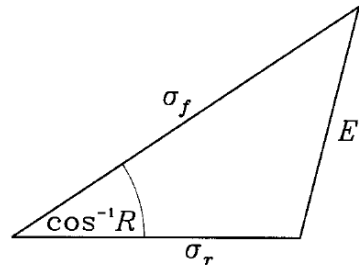


Figura 13: Relación geométrica entre el coeficiente de correlación R , el error cuadrático centrado E' y las desviaciones estándar σ_r y σ_f . (Taylor, 2001)

Para más información se remite al lector a la fuente original (Taylor, 2001) donde se demuestra que se puede construir un diagrama que cuantifica estadísticamente el grado de similitud entre dos variables: una denominada de referencia, que normalmente representa una observación, mientras que la otra representa una variable “test” (típicamente de una simulación).

Como se ha mencionado anteriormente el objetivo es cuantificar cuanto se parece la variable test a la referencia, para ello se puede construir el diagrama de la siguiente figura:

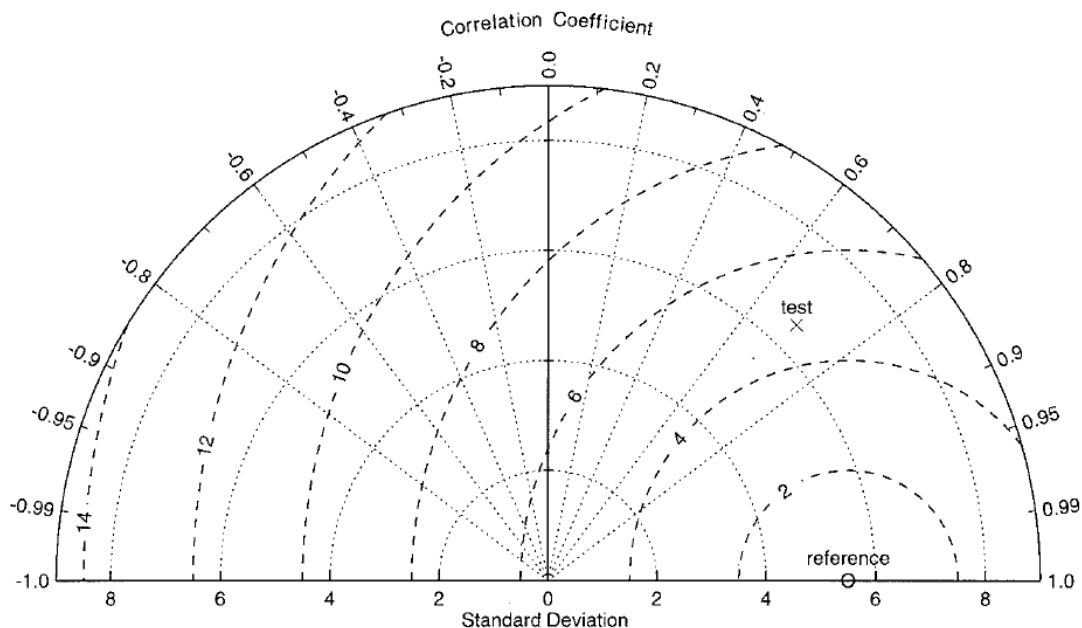


Figura 14: Diagrama de Taylor (Taylor, 2001). La distancia al origen es proporcional a la desviación estándar. La distancia RMS centrada entre referencia y test es proporcional a la distancia entre ellas. La correlación se representa mediante el ángulo

En la figura se han representado dos puntos en una gráfica polar con el círculo representando la referencia y el test representado por una cruz. Las distancias radiales desde el origen a los puntos son proporcionales a la desviación estándar de cada variable, mientras que la posición azimutal (ángulo) indica el coeficiente de correlación entre las dos variables. Finalmente las

líneas discontinuas radiales centradas en la referencia miden la distancia (en el sentido RMS) entre referencia y test.

La interpretación del diagrama de Taylor que se puede realizar del diagrama es la siguiente: cuando un test se acerque a la referencia indicará que tiene una correlación alta y una distancia reducida.

3.4.2. Resultados de la validación de los datos de viento

Como se ha explicado anteriormente podemos utilizar los diagramas de Taylor para visualizar de forma sencilla información sobre la correlación entre las predicciones del modelo meteorológico y las observaciones de la boyas, a la vez que muestran las diferencias en las varianzas (representadas por las desviaciones estándar). Por otra parte el diagrama también muestra simultáneamente el error cuadrático entre los miembros del modelo respecto a los valores medidos en la boya.

A continuación se comentan un ejemplo de los resultados obtenidos de esta validación de los datos de viento. Debido a la extensión de los datos, si el lector está interesado en otros casos puede consultar el ANEXO 1 de esta Tesina.

En estas gráficas se representa para cada componente del viento (colores azul y rojo respectivamente) la serie temporal correspondiente a un intervalo de 192 horas así como los diagramas de Taylor correspondientes a los intervalos de 0 a 72 horas (3 días) y de 0 a 192 horas (8 días). Esta distinción entre intervalos se realiza para comprobar si las predicciones con un horizonte más corto se parecen más a las observaciones como es de esperar.

En estos diagramas, además de comprobar la similitud de cada miembro del conjunto de predicciones con los vientos registrados en la boya se puede visualizar si los diferentes miembros del ensemble se parecen todos de igual manera a las observaciones de la boya.

En este ejemplo (ver figura a continuación), que corresponde a la comparación de las predicciones de viento generadas el 31/01/2015 con el viento registrado en la boya de Dragonera podemos observar que:

- En la representación en la serie temporal se puede observar que los miembros son similares a los registros en la boya, pero que cuando el horizonte se hace más grande los miembros empiezan a divergir.
- El diagrama de Taylor cuantifica esta divergencia: se observa que en el diagrama de Taylor para un intervalo de 72 horas los puntos que representan a los miembros están más cercanos al punto que representa la boya que en el diagrama de Taylor para 192 horas. Esto se explica porque la correlación y el error aumentan con el horizonte. Por tanto como cabía esperar la calidad de la predicción es menor cuanto mayor sea el horizonte de predicción.

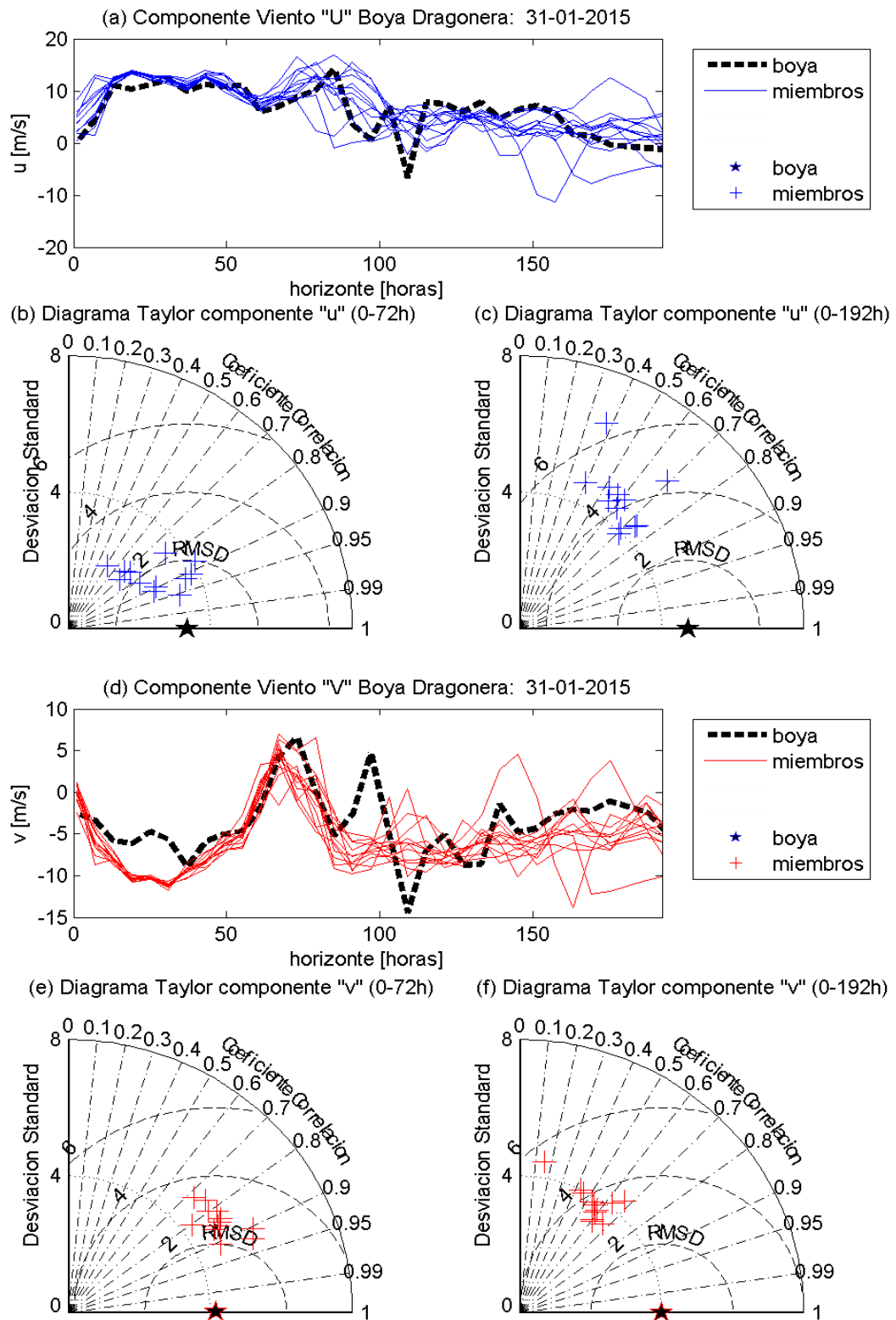
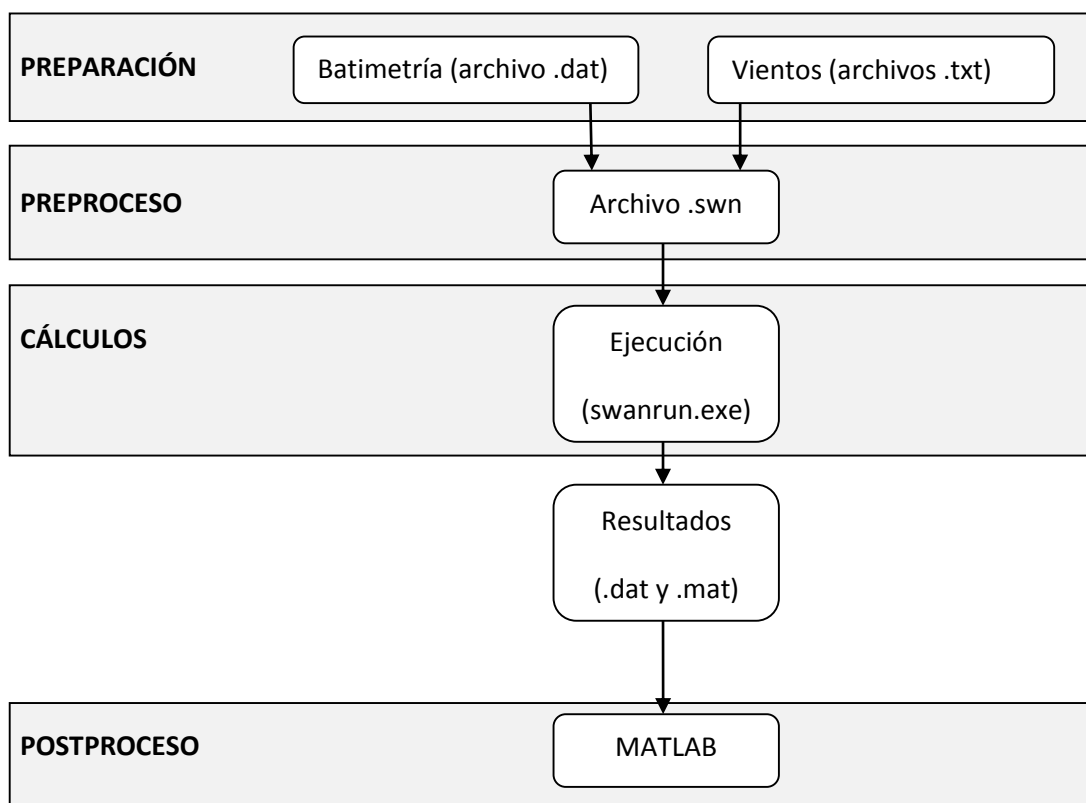


Figura 15: Comparación de predicciones de viento generadas el 31/01/2015 con el registro en la boya de Dragonera. Para la componente U (en azul) se muestra su serie temporal (a) así como los diagramas de Taylor dos ventanas temporales de 72 horas (b) y 192 horas(c). De la misma manera para la componente V (en rojo) se muestra su serie temporal (d) así como los diagramas de Taylor dos ventanas temporales de 72 horas (e) y 192 horas(f). Los vientos registrados en la boya se representan los diagramas de Taylor por una estrella mientras que cada miembro del conjunto de la predicción se representa mediante una cruz.

4. METODOLOGÍA: GENERACIÓN DE PREDICCIONES DE OLAJE

En este capítulo se describe el procedimiento operativo que se ha seguido para la obtención de las predicciones del oleaje. Como se ha expuesto anteriormente, dado un cierto día se dispone de los datos de conjuntos de previsiones de viento con un horizonte de 192 horas, con las cuales se quiere generar el oleaje. Este oleaje se generará a partir de introducir estos campos de viento (junto con la batimetría) en SWAN. Finalmente los resultados obtenidos se tratarán y visualizarán en Matlab. Todo este proceso se puede seguir en el esquema de la siguiente figura:



4.1 PREPARACIÓN DE LOS DATOS

SWAN requiere los datos de entrada en formato de texto ASCII. Puesto que los campos de viento se almacenaban en formato GRIB2, fue necesaria la conversión de formato mediante un programa escrito en Matlab. Los datos de batimetría no necesitaron ningún tipo de conversión.

De esta manera se programó una rutina en Matlab que descargaba los datos necesarios de la dirección FTP de la NOAA. El volumen de datos de viento en formato GRIB2 descargado por FTP corresponde a 500 MB por día de previsión. Posteriormente, con la ayuda de la toolbox NCTOOLBOX («NCTOOLBOX A Matlab toolbox for working with common data model

datasets») se pueden leer la estructura de la información de los archivos en formato GRIB2 y escribirla en formato ASCII con el orden y la estructura que requiere SWAN.

Finalmente los archivos de viento y batimetría se guardaron en la carpeta de trabajo para que pudiesen ser leídos por SWAN.

4.2 PREPROCESO (Escribir archivo SWAN)

SWAN no tiene una interfaz gráfica, sino que se ha de preparar un script (*.swn) con comandos para su ejecución posterior, por lo que se ha de vigilar que la sintaxis sea correcta. Esto provoca que su curva de aprendizaje sea lenta y el uso del manual imprescindible, pero como contrapartida una vez definido el script las modificaciones (por ejemplo cambiar los días de simulación) son muy rápidas.

En este archivo *.swn se define lo siguiente (consultar el manual de SWAN para una descripción completa en («TU Delft: SWAN»)):

- Encabezado
- Malla computacional: Área donde se realizarán los cálculos.
- Condiciones iniciales y de contorno: En nuestro caso no se imponen.
- Entradas del modelo: Archivos de Batimetría y campos de viento (en nuestro caso cada 6 horas).
- Opciones de modelización de la Física y configuración de los métodos numéricos
- Salidas: Datos que requerimos a la salida del modelo

SWAN toma sus valores por defecto en cualquier aspecto que no se describa explícitamente en este archivo.

4.2.1 Encabezado

Aquí se definen ciertos aspectos generales como el nombre del proyecto, se inicializan parámetros, se define la convención de direcciones (fijada náutica) el sistema de coordenadas (esféricas y con proyección Mercator en este caso), etc. También se le informa de que el problema es no estacionario (lo que se traduce en que SWAN considera el término $\partial N / \partial t$ de la ecuación de balance).

4.2.2 Malla computacional

Se ha de definir la malla computacional, esto es la zona geográfica donde se realizarán los cálculos y su resolución espacial junto con la resolución espectral considerada (intervalo de frecuencias y de direcciones). Lógicamente el dominio de esta malla computacional ha de ser menor que el del campo de vientos y la batimetría.

En este estudio las características de la malla computacional han sido las siguientes:

- Dominio (Longitud x Latitud)=[-0.45, 5.584826]x[39, 45.034826]
- Divisiones eje longitud=167 (que implica una resolución de $0.0361^\circ \approx 3\text{km}$)

- Divisiones eje latitud=172 (resolución de $0.0271^{\circ} \approx 3\text{km}$)
- Resolución espectral direccional= 10°
- Frecuencia mínima del espectro= 0.01 Hz
- Frecuencia máxima del espectro= 1 Hz

La resolución en frecuencia es fijada por SWAN automáticamente a partir de los datos anteriores y se distribuye una escala logarítmica. En este caso resultan 26 frecuencias.

4.2.3 Condiciones iniciales y de contorno

En este caso no se le impusieron condiciones de contorno en la frontera, por tanto el modelo interpreta que no hay entrada de energía desde fuera de la zona de cálculo. Esta aproximación es correcta si los límites están suficientemente alejados de la zona de estudio y la entrada del oleaje real no es muy grande, lo cual se cumple casi siempre (a excepción por ejemplo del temporal de Diciembre de 2008).

Tampoco se impusieron condiciones iniciales, así que a partir del viento del primer instante de tiempo calcula una situación de equilibrio. Sin embargo, en esta situación de equilibrio no se incluye lo que ha pasado con anterioridad, así que se pierde información., por lo que las primeras horas de previsión no serán válidas hasta que se estabilice. En SWAN este tiempo es corto, unas 12 horas como máximo. Este concepto se conoce como 'spin-up'.

4.2.4 Entradas del modelo

Batimetría: Se ha de especificar a SWAN el dominio el formato y las características de la malla de batimetría, que ya han sido comentadas en el capítulo de Fuentes de Datos (resolución malla $0.00833^{\circ} \approx 0.8\text{km}$), y la ruta del archivo en la cual está almacenada.

Campos de Viento: Se ha de especificar el dominio el formato y las características de la malla de los campos de vientos (resolución $1^{\circ} \approx 100\text{ km}$). Se hace notar que esta resolución es bastante más pobre que la de la malla computacional y la de la malla de batimetría. Se especifica también la ruta de los archivos de viento (cada archivo de viento corresponderá a la previsión en un cierto instante de tiempo). En nuestro caso se especifica que los archivos de viento tienen una separación temporal de 6 horas.

4.2.5 Opciones de modelización de la física y configuración de los métodos numéricos

Modelización de la Física: Le indicamos que use el modelo de tercera generación para la entrada del viento, las interacciones entre cuádrupletes y el *whitecapping* También se usa Komen (Komen et al, 1984) para el crecimiento de olas con el viento.

Por otra parte fijamos que el *whitecapping* corresponda al modelo de Komen (Komen et al., 1984) con los coeficientes calibrados para la zona de estudio (Pallares et al., 2014). Dejamos desactivadas la fricción de fondo, rotura y las triadas ya que son procesos que solo afectan en aguas someras y que tienen unas formulaciones poco comprobadas, por lo cual es más adecuado omitirlos que introducir posibles errores

Esquema Numérico: Le indicamos que utilice el esquema de computación BSBT (*Backward Space Backward Time*) para el cálculo numérico que es un esquema implícito (que son siempre numéricamente estables, independiente de la precisión de la malla y el paso de tiempo).

Precisión numérica: Con el fin de no alargar demasiado los cálculos también se impuso un límite a las iteraciones (15) en el caso de que no se alcanzase la convergencia en los instantes iniciales. Por otra parte se indica a SWAN que puede interrumpir las iteraciones si en un 98% de los puntos de la malla se cumple que los cambios en la altura significativa y en el periodo medio ya son menores que un cierto umbral (el 0.01% del valor en ese punto ó el 0.02% calculado sobre la media cuadrática de todos los puntos de la malla). También se limitan los cambios direccionales limitando $c_\theta < 2$ con el objeto de evitar problemas de difracción de un punto a otro de la malla.

4.2.6 Salidas del modelo

SWAN requiere que se especifiquen las salidas de resultados que se desean. Se fijó que para el cómputo de la altura significativa (HSIG), periodo medio cruce por cero (HM02), dirección (DIR) y periodo medio significativo (PER) se utilizasen solo las frecuencias comprendidas en el intervalo [0.03Hz 0.6Hz] ya que corresponden al rango frecuencial de la función de transferencia del funcionamiento la boya y nos permitirán comparar simulaciones y medidas en condiciones equivalentes. En este caso se especifican:

Boyas: Se especifica la posición de cada punto de control (boya) y se demandan cada hora los datos de cada boya en un archivo diferente: tiempo, profundidad (BOTLEV), altura ola significativa (HSIG), Periodo Medio Significante (PER), Periodo de Pico (RTP), Dirección media oleaje (DIR), Dirección de Pico (PDIR).

Malla: Se piden los resultados cada 3 horas de:

- Coordenadas y profundidad de los puntos de la malla (BOTLEV)
- Altura significativa de ola (HSIG)
- Periodo Medio Significante (PER)
- Periodo de Pico (RTP)
- Dirección media oleaje (DIR)
- Dirección de Pico (PDIR)

4.2.7 “Lock up”

Se calculan las condiciones cada 20 minutos (paso temporal de integración).

4.3 CÁLCULOS EN SWAN

Se instaló el software SWAN (versión 41.01) en el cluster de cálculo intensivo de la ETSECCPB. Este cluster está formado por 4 nodos Intel Xeon (Quadcore 2.4GHz, 128 GB RAM) y 2 nodos AMD Opteron (Quadcore 2.5 GHz, 32 GB RAM) que funcionan con el sistema operativo Unix y un gestor de colas. En este sistema se subían los archivos de datos mediante una conexión SSH

con WinSCP y se ejecutaban los comandos escritos en bash para lanzar los procesos mediante putty.

El uso de este sistema permitió la ejecución de varias simulaciones simultáneamente, reduciendo el tiempo de generación de los resultados respecto a un ordenador personal. A modo de referencia una simulación completa de un solo miembro del conjunto con un horizonte de 9 días suponía un tiempo de cálculo de 5 horas en un solo núcleo de cálculo. Por tanto la simulación de todo el ensemble (incluidos media y control) tenía un coste de $5 \cdot 12 = 60$ horas. Afortunadamente se podían lanzar 5 simulaciones cada vez en el clúster de cálculo, lo cual reducía el tiempo a 12 horas. Como se querían simular episodios de 15 días esto requería 180 horas (algo más de una semana) de tiempo de cálculo para cada uno. El tiempo real era superior, puesto que no era posible programar el inicio de los cálculos, sino que se tenía que ordenar de manera manual.

Si no hay errores durante la ejecución SWAN genera los siguientes archivos:

- *norm_end*: archivo de texto con un mensaje de que la ejecución ha sido correcta.
- *print.prt*: información ("log") sobre la ejecución y el tiempo consumido.
- **.mat*: archivo binario con los resultados de la simulación. Contiene las variables que se hayan especificado con anterioridad.
- **.dat*: archivos de texto los resultados de las boyas que se hayan especificado con anterioridad

4.3.1 Consideraciones sobre el Coste Computacional

Como se ha comentado anteriormente en el Capítulo 2 necesitamos integrar la ecuación de balance integración sobre una malla de cálculo que se implementa en diferencias finitas en 5 dimensiones (tiempo, espacio y espacio espectral). Esto implica que tenemos que resolverla para:

- Número de puntos en la malla: 27000
- Número de discretizaciones de direcciones en el espectro: 36
- Número de frecuencias del espectro: 48

Con esto nos vamos a $27000 \cdot 36 \cdot 48 = 47$ millones de ecuaciones, que tienen que ser resueltas para cada paso de tiempo de 20 minutos en nuestro caso, que para una predicción de 192 horas implica resolverlas 576 veces.

4.4 POSTPROCESO EN MATLAB

SWAN carece de un visor de los resultados que genera. Por tanto se utilizara MATLAB para la visualización de los resultados, así como para su tratamiento y procesado. MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory, (The Mathworks)) es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo con un lenguaje de programación en alto nivel (lenguaje M).

5. RESULTADOS

En este capítulo se exponen los resultados que se han obtenido a partir de los diferentes estudios realizados en el marco de esta Tesina.

5.1. PRESENTACIÓN Y VISUALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS

Las simulaciones realizadas en esta Tesina proporcionaron una gran cantidad de datos en bruto. Se generaron conjuntos de predicciones (cada una compuesta de varios miembros) para cada día analizado y con un horizonte de 192 horas cada una. La consecuencia de disponer de tanta información es que se hace necesario escoger adecuadamente la forma de presentación que se utilizará con el objeto de poder extraer conclusiones útiles.

Estos resultados, obtenidos a partir de las simulaciones en SWAN para cada predicción, se pueden visualizar mediante mapas, donde se representa el oleaje para cada punto del mar en un instante determinado o mediante series temporales, en las cuales se representa la evolución de una propiedad del oleaje en un único punto a lo largo de todo un episodio de temporal.

Aun así la cantidad de gráficas sería demasiado numerosa si se quisiesen presentar con todo detalle, por lo que se ha optado por mostrar aquí únicamente los resultados más representativos del comportamiento de las simulaciones de los cuales se puedan extraer conclusiones.

5.2. EPISODIO DEL 23/02/2013 al 09/03/2013

Tal como se ha expuesto en el Capítulo 3, se pretende evaluar el comportamiento de las predicciones generadas por SWAN a partir de los campos de vientos. Para ello se dispone de las medidas registradas en boyas, tal como se muestra en la siguiente figura.

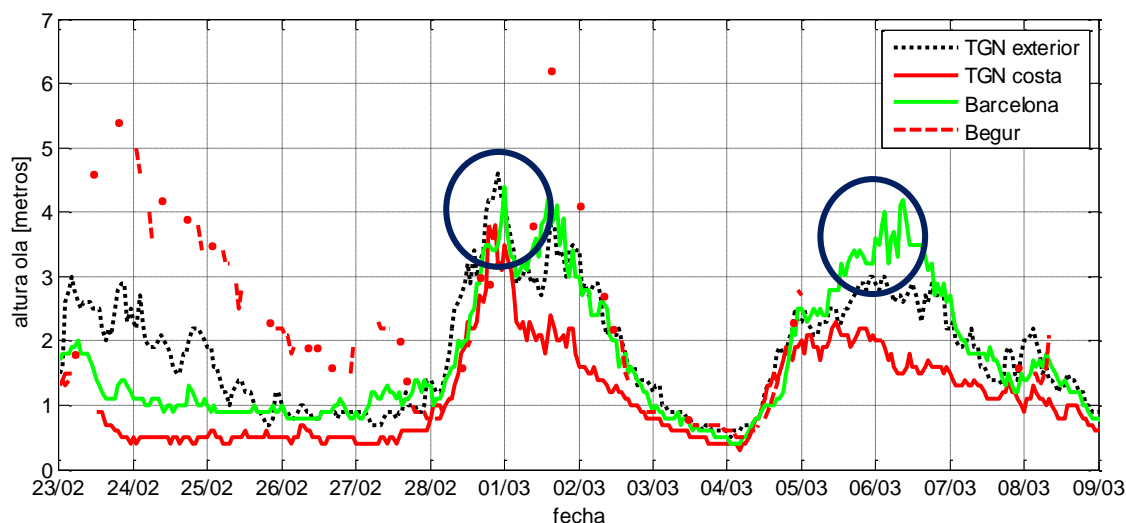


Figura 16: Registros de boyas del primer periodo de estudio (23/02/2013 al 09/03/2013)

En este episodio nos centraremos en el análisis del comportamiento de las predicciones generadas que cubran los picos de los días 1 de Marzo (primer pico) y 6 de Marzo (segundo pico), indicados con un círculo en la figura anterior.

5.2.1 Mapas de altura de ola

Para cada episodio de temporal analizado se muestra en primer lugar el mapa de alturas de ola obtenido en un instante temporal de interés.

Es decir en el mapa que representa las alturas de ola se representa únicamente un instante temporal (una foto fija), el cual está compuesto por un conjunto de n diferentes miembros. En nuestro caso son los correspondientes a los miembros control (c00) y 10 perturbaciones (p01,..., p10) del conjunto, además de la predicción generada por la media del conjunto de miembros del viento y la media obtenida a partir de las predicciones del oleaje. Adicionalmente se representa la serie temporal del registro de las boyas para ese instante de tiempo indicado por una línea vertical. Estos mapas son útiles para visualizar cómo evolucionan los diferentes miembros entre sí y a lo largo del tiempo.

Este instante temporal se puede predecir con m días de antelación (horizonte máximo de la predicción, en nuestro caso 192 horas que equivalen a 8 días), con lo cual podemos comparar el comportamiento de la predicción a partir de los mapas generados en los m , $m-1$, ..., 1 días anteriores (para cada miembro). Por tanto para representar la información que se ha generado para un único instante temporal son necesarios $n \times m-1$ mapas.

Estudio del primer pico de tormenta del día 28/02/2013 a las 18:00h

En las figuras 17, 18, 19 y 20 se muestran los mapas de altura de ola de la predicción generada con los datos de viento disponibles los días 24, 25, 26 y 27 de Febrero del 2013 (que corresponden aproximadamente a 5, 4, 3 y 2 días de horizonte de predicción respectivamente).

Se puede observar que aunque en principio la distribución espacial de cada miembro es diferente, conforme el horizonte de predicción se reduce más miembros coinciden en detectar el pico del temporal. Por tanto en este caso del análisis de las gráficas se desprende que:

- a) Horizonte 5 días (predicción de día 24/02/2013): Sólo dos miembros del conjunto detectan una tormenta pero en una posición donde las boyas no se verían afectadas.
- b) Horizonte 4 días (predicción de día 25/02/2013): Nueve miembros del conjunto detectan una tormenta pero con distribuciones espaciales muy diferentes.
- c) Horizonte 3 días (predicción de día 26/02/2013): Todos los miembros del conjunto detectan una tormenta.
- d) Horizonte 2 días (predicción de día 27/02/2013): Todos los miembros del conjunto detectan una tormenta.

Por tanto en este caso se podría considerar que el pico temporal se predice con cuatro días de antelación, ya que la mayoría de miembros consideran que se va a producir un temporal.

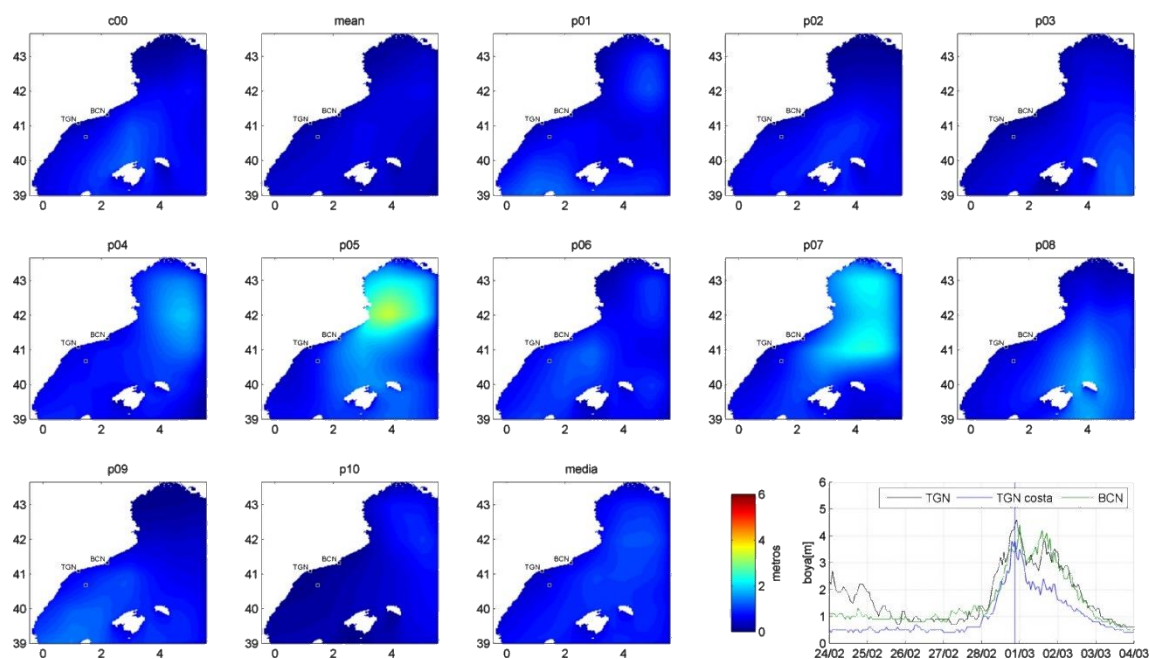


Figura 17: Mapas de alturas de olas de la predicción del pico de tormenta a partir de los datos de viento del día 24/02/2013. Se representan los diferentes miembros del conjunto: control (c00) y perturbaciones (p01,..., p10) del conjunto, además de la predicción generada por la media del conjunto de miembros del viento ("mean"). Adicionalmente se representa la media obtenida a partir de las predicciones del oleaje ("media"). La última gráfica corresponde a las alturas registradas en las boyas.

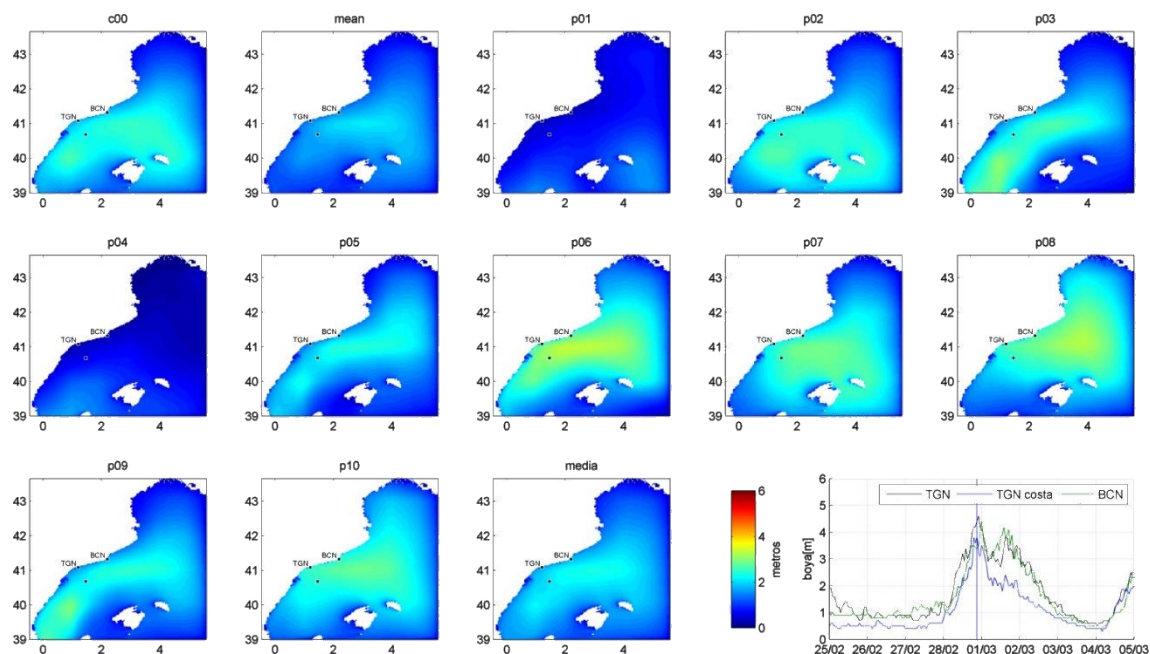


Figura 18:: Mapas de alturas de olas de la predicción del pico de tormenta a partir de los datos de viento del día 25/02/2013. Se representan los diferentes miembros del conjunto: control (c00) y perturbaciones (p01,..., p10) del conjunto, además de la predicción generada por la media del conjunto de miembros del viento ("mean"). Adicionalmente se representa la media obtenida a partir de las predicciones del oleaje ("media"). La última gráfica corresponde a las alturas registradas en las boyas.

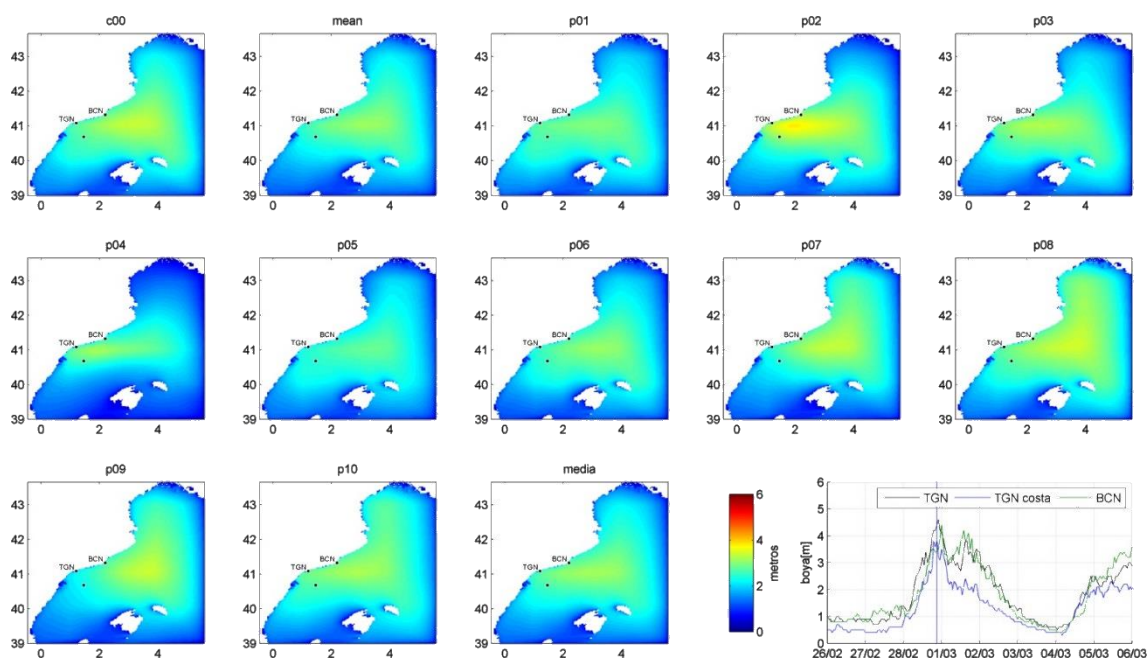


Figura 19: Mapas de alturas de olas de la predicción del pico de tormenta a partir de los datos de viento del día 26/02/2013. Se representan los diferentes miembros del conjunto: control (c00) y perturbaciones (p01,..., p10) del conjunto, además de la predicción generada por la media del conjunto de miembros del viento ("mean"). Adicionalmente se representa la media obtenida a partir de las predicciones del oleaje ("media"). La última gráfica corresponde a las alturas registradas en las boyas.

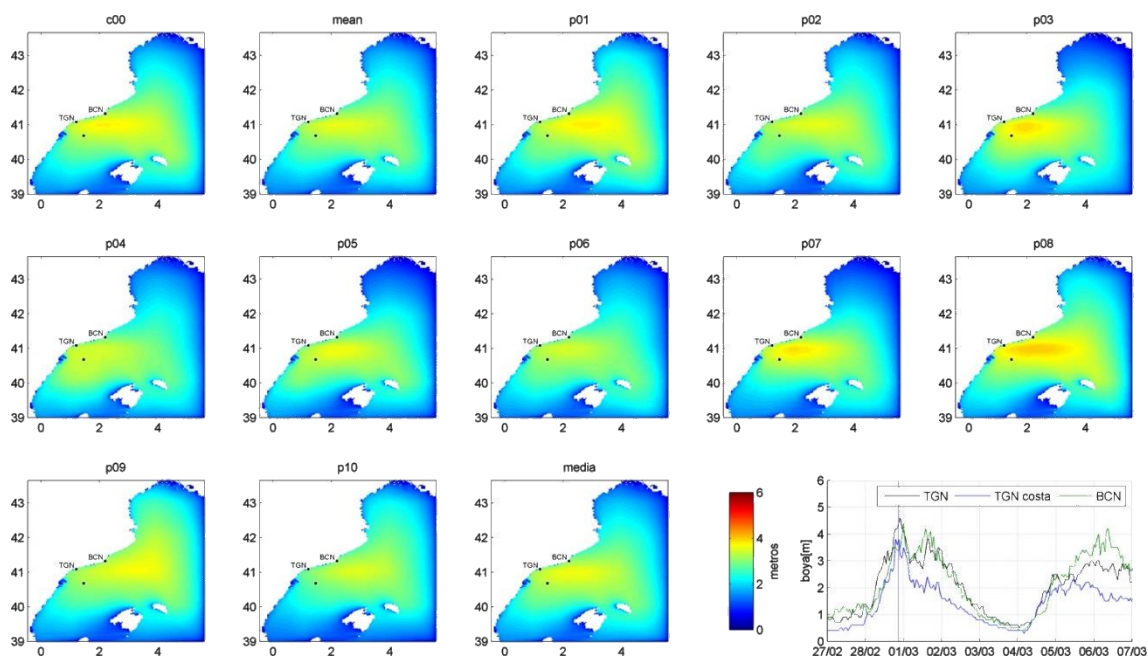


Figura 20: Mapas de alturas de olas de la predicción del pico de tormenta a partir de los datos de viento del día 27/02/2013. Se representan los diferentes miembros del conjunto: control (c00) y perturbaciones (p01,..., p10) del conjunto, además de la predicción generada por la media del conjunto de miembros del viento ("mean"). Adicionalmente se representa la media obtenida a partir de las predicciones del oleaje ("media"). La última gráfica corresponde a las alturas registradas en las boyas.

Estudio del segundo pico de tormenta del día 6/03/2013 a las 0:00h

En las figuras 21, 22, 23 y 24 se muestra la predicción generada con los datos de viento disponibles los días 1, 2, 3 y 4 de Febrero del 2013 (que corresponden aproximadamente a 5, 4, 3 y 2 días de horizonte respectivamente).

En este caso desde un primer momento (horizonte 5 días) todos los miembros del conjunto predicen la aparición de un temporal, si bien centrado al norte de la zona de estudio y con poca incidencia en los puntos donde están posicionadas las boyas de medición. Como en el caso anterior las distribuciones espaciales del oleaje de cada miembro se hacen más parecida entre sí cuando el horizonte de predicción es menor.

Por tanto se puede decir que se predice un temporal pero su extensión no abarca los puntos de registro de las boyas. Es decir según la predicción el oleaje en los puntos de las boyas no constituye un temporal, con lo que podemos decir que la predicción aquí falla.

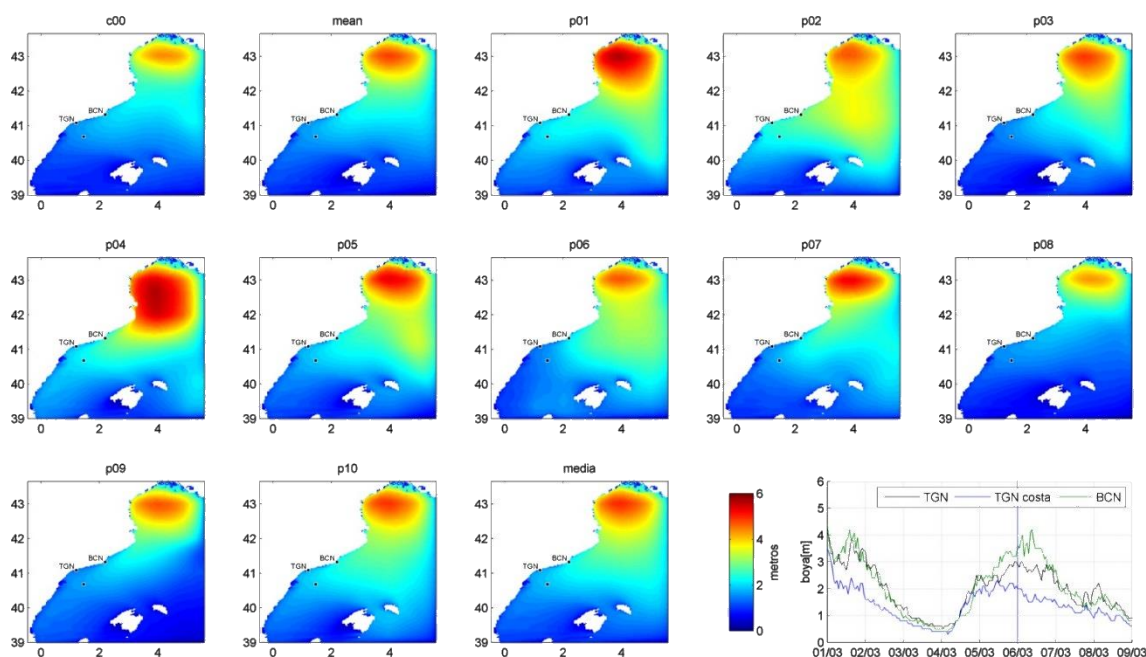


Figura 21: Mapas de alturas de olas de la predicción del pico de tormenta a partir de los datos de viento del día 01/03/2013. Se representan los diferentes miembros del conjunto: control (c00) y perturbaciones (p01,..., p10) del conjunto, además de la predicción generada por la media del conjunto de miembros del viento ("mean"). Adicionalmente se representa la media obtenida a partir de las predicciones del oleaje ("media"). La última gráfica corresponde a las alturas registradas en las boyas.

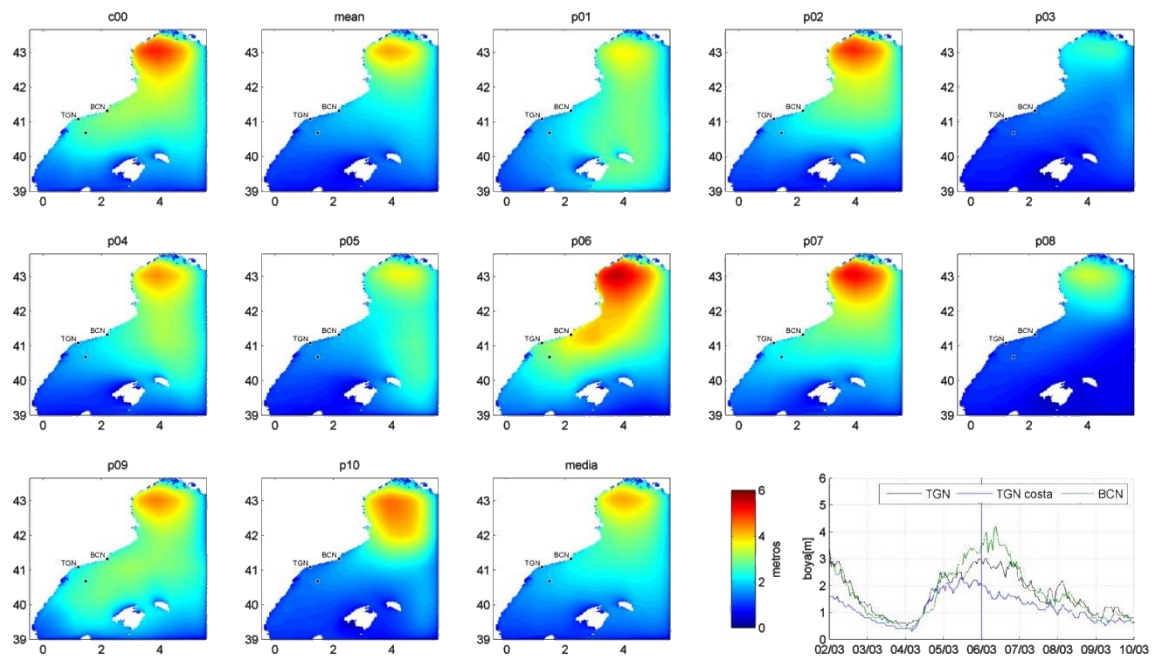


Figura 22: Mapas de alturas de olas de la predicción del pico de tormenta a partir de los datos de viento del día 02/03/2013. Se representan los diferentes miembros del conjunto: control (c00) y perturbaciones (p01,..., p10) del conjunto, además de la predicción generada por la media del conjunto de miembros del viento ("mean"). Adicionalmente se representa la media obtenida a partir de las predicciones del oleaje ("media"). La última gráfica corresponde a las alturas registradas en las boyas.

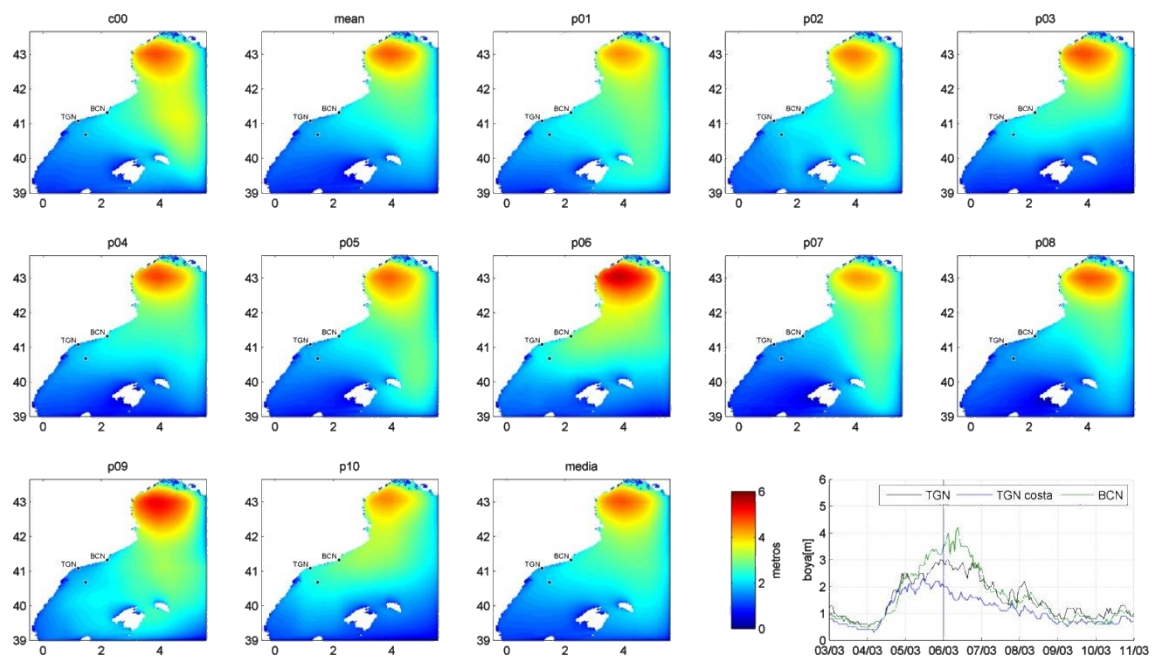


Figura 23: Mapas de alturas de olas de la predicción del pico de tormenta a partir de los datos de viento del día 03/03/2013. Se representan los diferentes miembros del conjunto: control (c00) y perturbaciones (p01,..., p10) del conjunto, además de la predicción generada por la media del conjunto de miembros del viento ("mean"). Adicionalmente se representa la media obtenida a partir de las predicciones del oleaje ("media"). La última gráfica corresponde a las alturas registradas en las boyas.

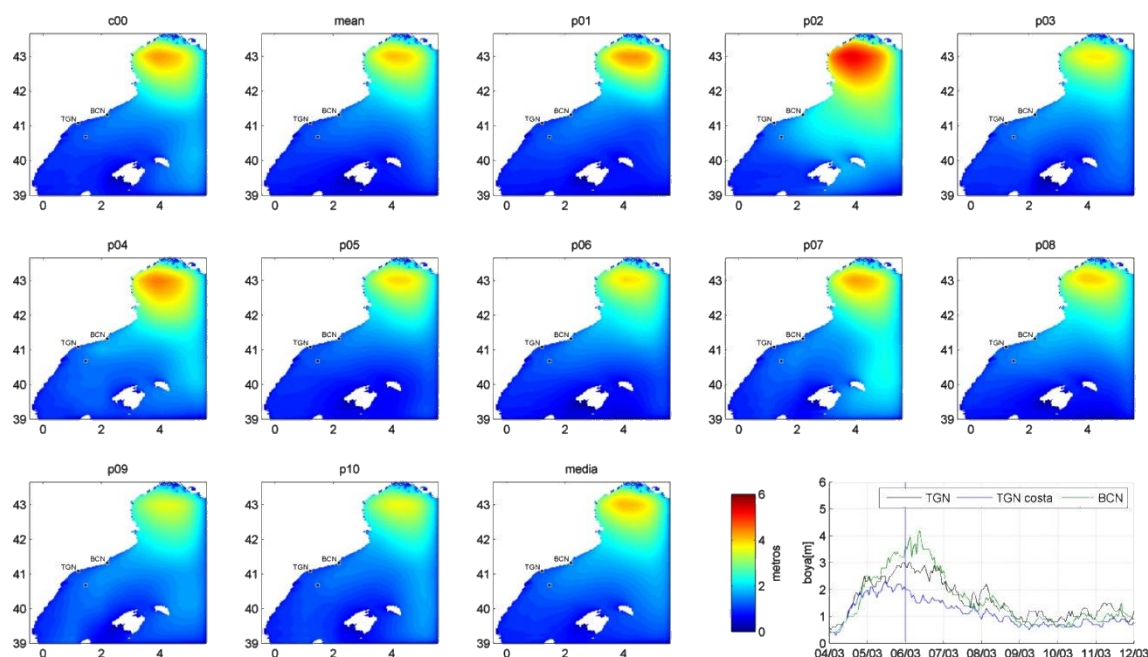


Figura 24: Mapas de alturas de olas de la predicción del pico de tormenta a partir de los datos de viento del día 03/03/2013. Se representan los diferentes miembros del conjunto: control (c00) y perturbaciones (p01,..., p10) del conjunto, además de la predicción generada por la media del conjunto de miembros del viento ("mean"). Adicionalmente se representa la media obtenida a partir de las predicciones del oleaje ("media"). La última gráfica corresponde a las alturas registradas en las boyas.

5.2.2 Mapas de probabilidad

Los mapas de probabilidad representan la probabilidad de excedencia de una determinada altura de oleaje umbral. Puesto que los miembros de la predicción constituyen una distribución, es posible calcular la probabilidad asociada a una determinada altura de oleaje para cada punto del espacio en un determinado instante temporal y de esta forma generar mapas de probabilidad.

Mediante este método se han representado los mapas de probabilidad asociados a una altura de oleaje umbral de 2, 2.5, 3, 3.5 y 4 metros respectivamente.

Una de las principales ventajas de la predicción por técnicas de conjuntos es que permiten obtener estos mapas de probabilidad, que no son factibles con una predicción determinista. Su valor añadido radica en que proporcionan una probabilidad de ocurrencia de un suceso que se pueda considerar de riesgo, por tanto si la probabilidad de ocurrencia es alta, se podrán activar las medidas preventivas correspondientes.

Estudio del primer pico de tormenta del día 28/02/2013 a las 18:00h

En las figuras 25, 26, 27 y 28 se muestra los mapas de probabilidad a partir de la predicción generada con los datos de viento disponibles los días 24, 25, 26 y 27 de Febrero del 2013 (que corresponden aproximadamente a 5, 4, 3 y 2 días de horizonte respectivamente)

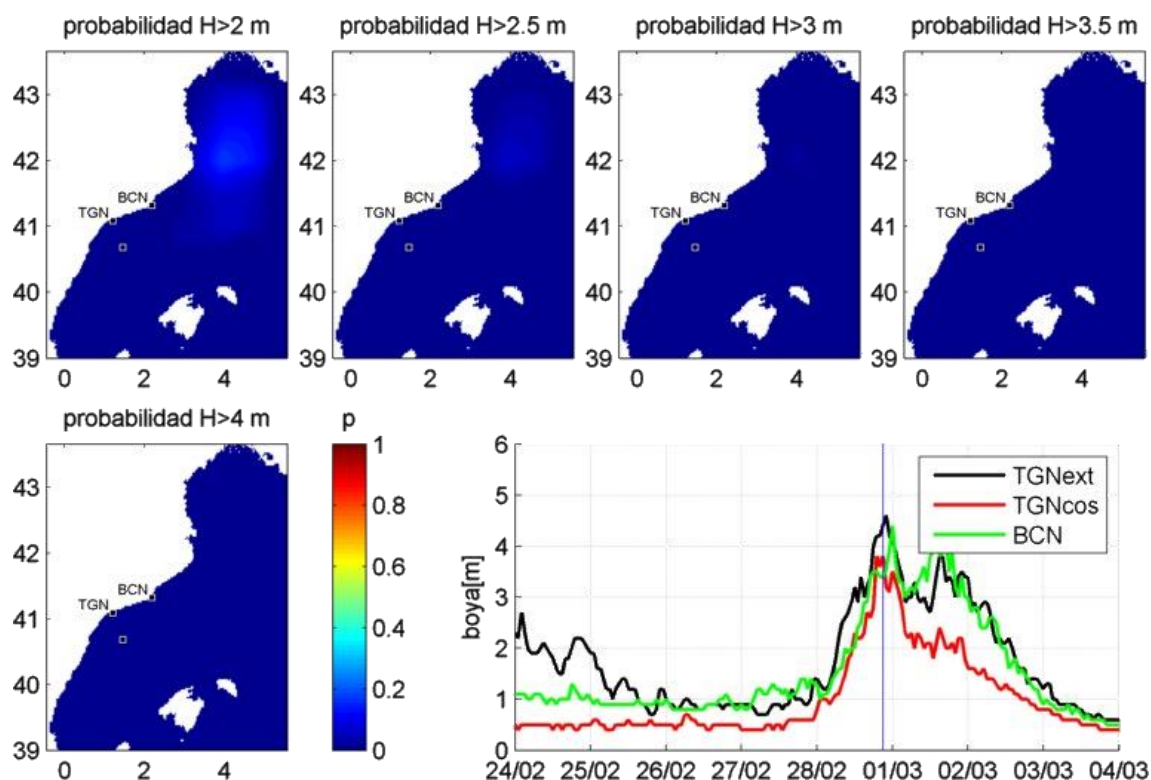


Figura 25: Mapas de probabilidades de excedencia de una determinada altura de ola (2,2.5,3,3.5 y 4 metros) a partir de los datos de viento correspondientes al día 24/02/2013. También se representan los registros de oleaje de las boyas donde la línea vertical indica el instante temporal que se representa en los mapas.

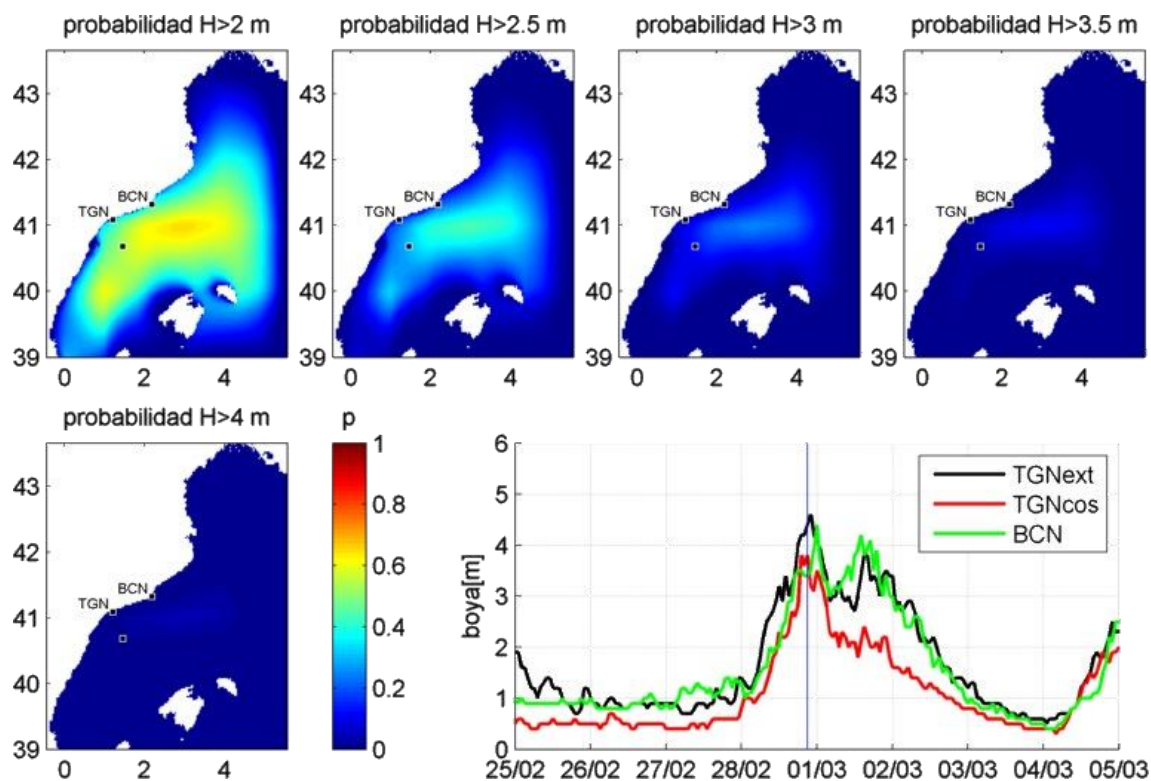
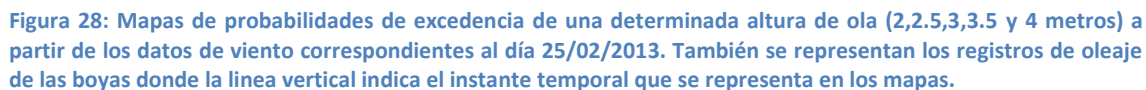
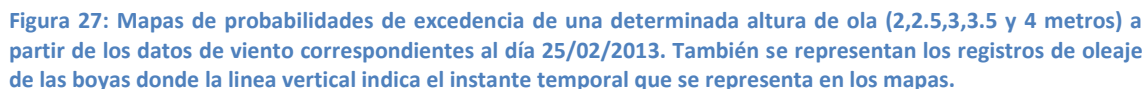


Figura 26: Mapas de probabilidades de excedencia de una determinada altura de ola (2,2.5,3,3.5 y 4 metros) a partir de los datos de viento correspondientes al día 25/02/2013. También se representan los registros de oleaje de las boyas donde la línea vertical indica el instante temporal que se representa en los mapas.



En estos mapas que se han presentado en las figuras anteriores se observa que conforme el horizonte de predicción es más cercano al pico del temporal la probabilidad es más alta, es decir que una predicción a menor número de días vista tiene más probabilidad de detectar el temporal.

Por otra parte se puede observar como la probabilidad de ocurrencia de oleajes mayores de 4 metros es nula en todo el dominio de estudio, mientras que la altura de oleaje registrada en las boyas en el pico de tormenta sí que es mayor de 4 metros en las boyas. Parece ser que existe un efecto de minusvaloración de la probabilidad de la aparición del oleaje.

Estudio del segundo pico de tormenta del día 6/03/2013 a las 0:00h

En las figuras 29, 30, 31 y 32 se muestra la predicción generada con los datos de viento disponibles los días 1, 2, 3 y 4 de Febrero del 2013 (que corresponden aproximadamente a 5, 4, 3 y 2 días de horizonte respectivamente).

Se observa que al principio el temporal comienza con una extensión, que se reduce para luego volver a crecer final, es decir la tendencia va cambiando a lo largo de la predicción. Por otra parte el comportamiento es similar al caso anterior respecto a la infravaloración de la probabilidad de ocurrencia de oleajes altos.

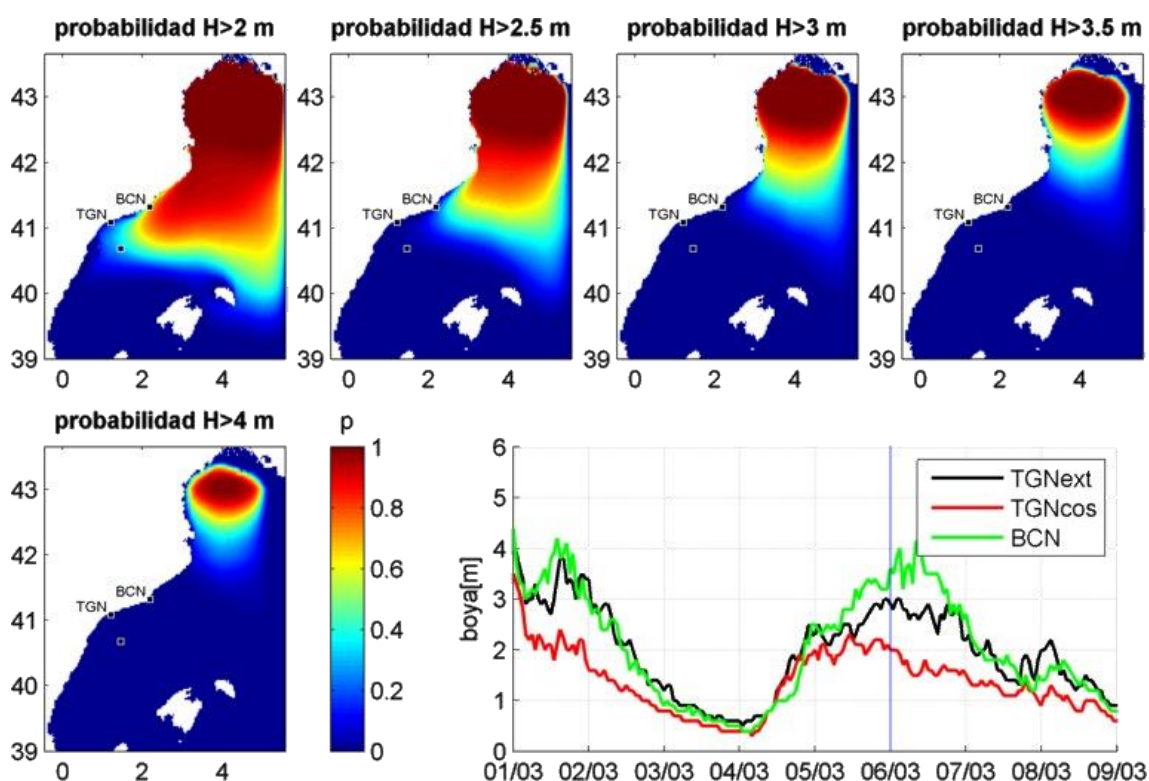


Figura 29: Mapas de probabilidades de excedencia de una determinada altura de ola (2,2.5,3,3.5 y 4 metros) a partir de los datos de viento correspondientes al día 01/03/2013. También se representan los registros de oleaje de las boyas donde la línea vertical indica el instante temporal que se representa en los mapas.

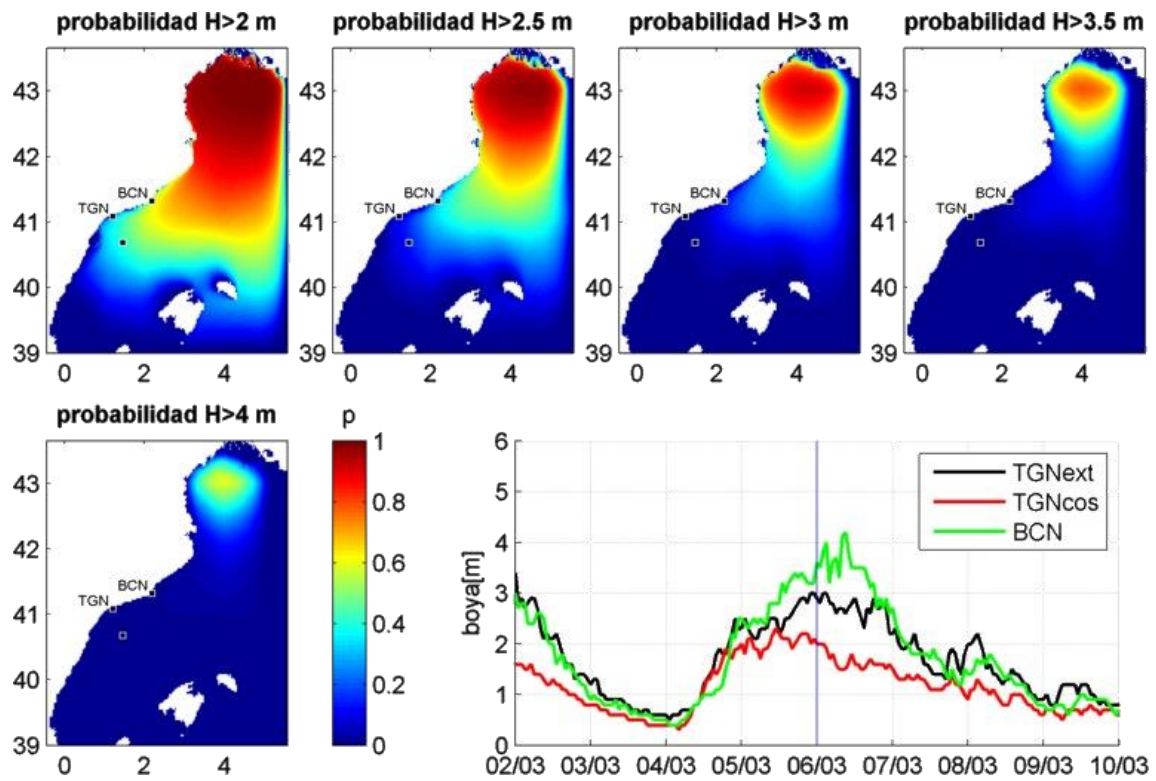


Figura 30: Mapas de probabilidades de excedencia de una determinada altura de ola (2,2.5,3,3.5 y 4 metros) a partir de los datos de viento correspondientes al día 02/03/2013. También se representan los registros de oleaje de las boyas donde la línea vertical indica el instante temporal que se representa en los mapas.

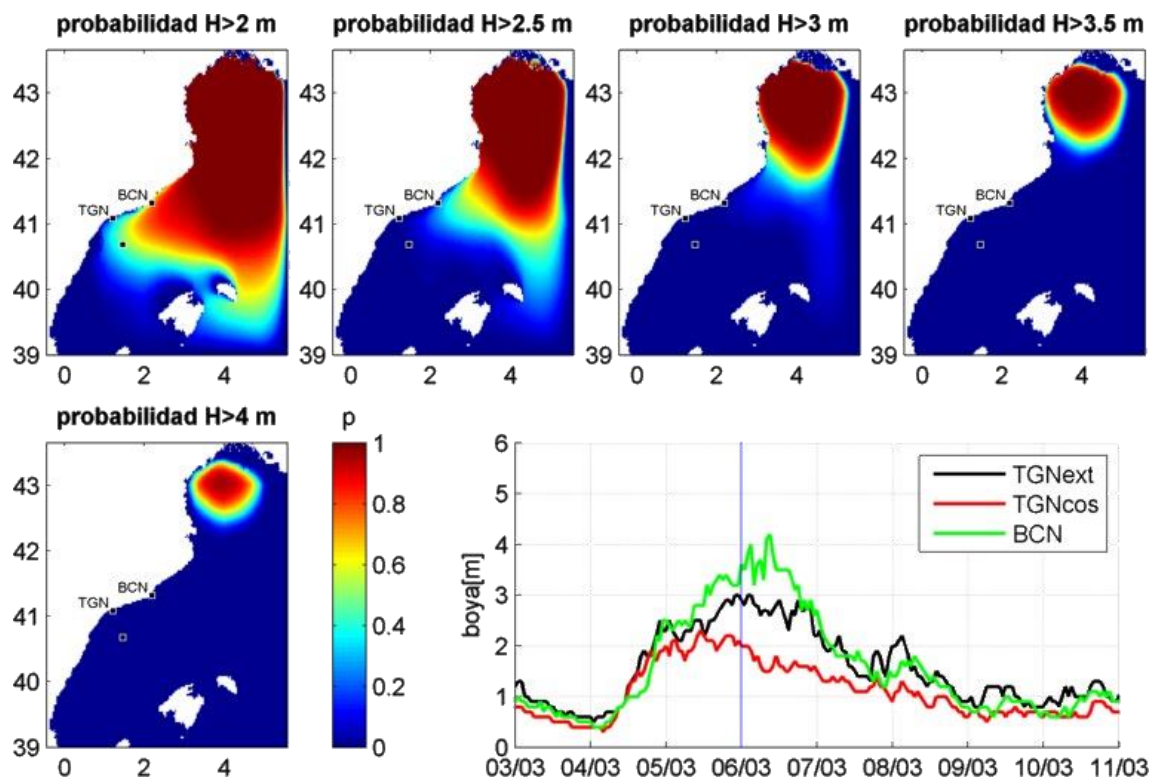


Figura 31: Mapas de probabilidades de excedencia de una determinada altura de ola (2,2.5,3,3.5 y 4 metros) a partir de los datos de viento correspondientes al día 03/03/2013. También se representan los registros de oleaje de las boyas donde la línea vertical indica el instante temporal que se representa en los mapas.

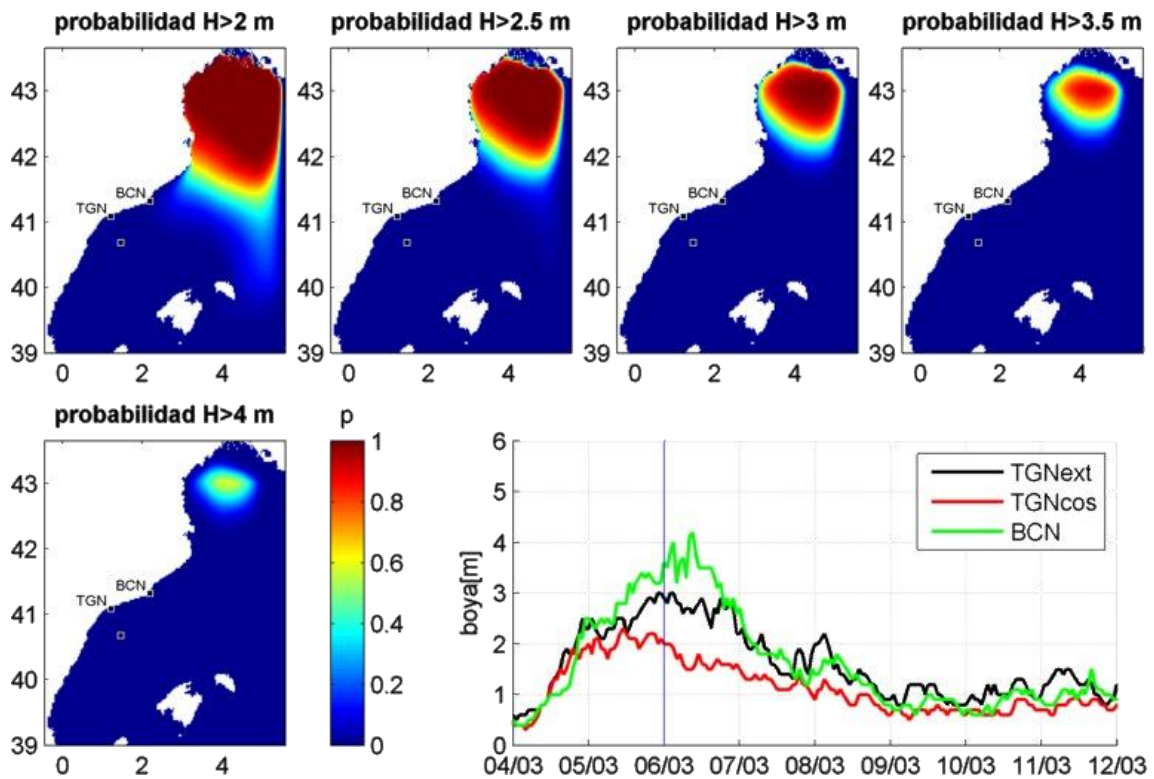


Figura 32: Mapas de probabilidades de excedencia de una determinada altura de ola (2,2.5,3,3.5 y 4 metros) a partir de los datos de viento correspondientes al día 04/03/2013. También se representan los registros de oleaje de las boyas donde la línea vertical indica el instante temporal que se representa en los mapas.

5.2.3 Series temporales de altura y periodo del oleaje

Finalmente se presentan las series temporales que nos servirán como validación al contrastar los resultados de las predicciones generadas diariamente con los datos reales registrados por las boyas. En estas gráficas, en las cuales también se ha representado el periodo junto con la altura del oleaje, además de poderse visualizar el grado de correspondencia entre la predicción y los registros de las boyas de una manera general también nos permiten evaluar diferentes aspectos más detallados sobre la calidad de las predicciones de cada miembro:

- Sensibilidad y especificidad: Cuando se produce un temporal la predicción es capaz de captarlo, e inversamente cuando una predicción capta un temporal es que realmente se produce uno.
- Fidelidad de la altura y el periodo del oleaje y el periodo: La predicción además de captar un temporal son capaces de reproducir la altura y el periodo del oleaje real.
- Duración del temporal, es decir si los instantes de inicio y fin del temporal predicho se corresponden con la realidad.

Adicionalmente las gráficas permiten visualizar el comportamiento de los miembros entre sí, es decir si difieren mucho entre ellos o no. En general los miembros divergirán más entre sí cuando el horizonte de predicción se haga mayor, pero también lo hacen cuando hay discrepancias en la predicción. Es decir la divergencia es una medida de la incertidumbre de la predicción.

En las figuras 33 a 47 se observan los casos correspondientes a las predicciones generadas con los datos de viento disponibles del día 23/02/2013 al día 09/03/2013 en las cuales se representan las series temporales de los diferentes miembros y el registro de las boyas. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (Hs) y b) los periodos (Tp) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boyas, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea más fina de color azul.

Se ha resumido su comportamiento en la siguiente tabla que se presenta a continuación. En la tabla se muestra el día en que se ha generado la predicción, el horizonte temporal hasta el (los) temporale(s) que aparecen durante el periodo considerado y la evaluación de la captación del temporal por parte del modelo (que si existe un temporal sea captado y que si se predice que exista). También se presenta la evaluación de la fidelidad de la altura del oleaje y el periodo, así como la duración del temporal.

Día	Horizonte temporales	Captación temporales	Fidelidad altura	Fidelidad periodo	Duración temporal
23/02/2013	6 días	Regular	Subestimación	Subestimación	Bien
24/02/2013	5 días	Mala	Subestimación	Subestimación	No aplica
25/02/2013	4 días	Buena	Subestimación	Buena	Corta
26/02/2013	3 días	Buena	Subestimación	Buena	Bien
27/02/2013	2 días y 7 días	Buena	Subestimación	Buena	Bien
28/02/2013	1 día y 6 días	Buena	Adecuada	Buena	Bien
01/03/2013	5 días	Buena	Subestimación	Buena	Corta
02/03/2013	4 días	Buena	Subestimación	Buena	Corta
03/03/2013	3 días	Buena	Subestimación	Buena	Corta
04/03/2013	2 días	Buena	Subestimación	Buena	Corta
05/03/2013	1 día	Mala	Subestimación	Buena	No aplica
06/03/2013	No hay	Buena	Buena	Buena	No aplica
07/03/2013	No hay	Buena	Buena	Buena	No aplica
08/03/2013	No hay	Buena	Buena	Buena	No aplica
09/03/2013	7 días	Buena	Subestimación	Buena	Bien

Tabla 4: Evaluación de las predicciones generadas cada día. Para la predicción generada en un día determinado se muestra el horizonte temporal de la tormenta y la evaluación de la captación del temporal, de la altura del oleaje, del periodo y de la duración del temporal.

A partir de los resultados de esta tabla se desprende que en general la captación de los temporales es buena, pero sin embargo casi siempre hay una subestimación de las alturas del oleaje. Esta subestimación afecta además a la duración predicha de los temporales, que en general es demasiado corta. Si se observan con más detalle las gráficas se aprecia que la duración más reducida de los temporales afecta principalmente al final del temporal, mientras que por otra parte la rampa de subida al inicio del temporal es captada con mucha mejor precisión. Por otra parte el periodo del oleaje es predicho con una precisión mucho más elevada que la altura del oleaje, tal como se puede observar en las gráficas.

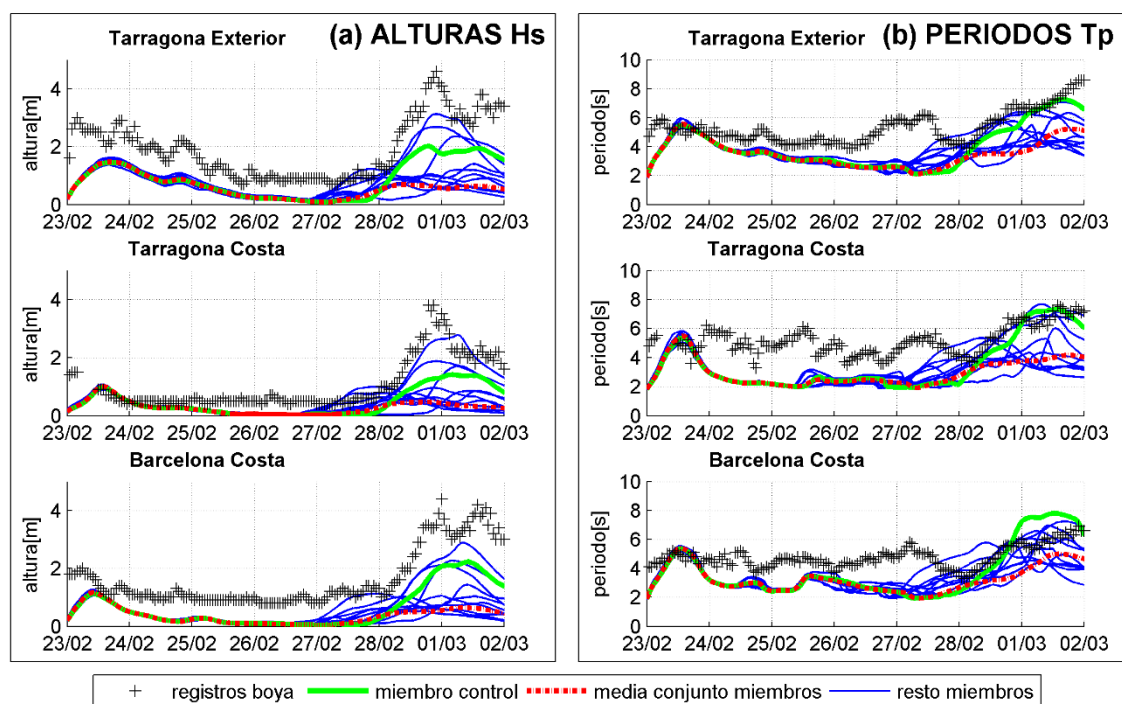


Figura 33: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 23/02/2013 para un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (Hs) y b) los periodos (Tp) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

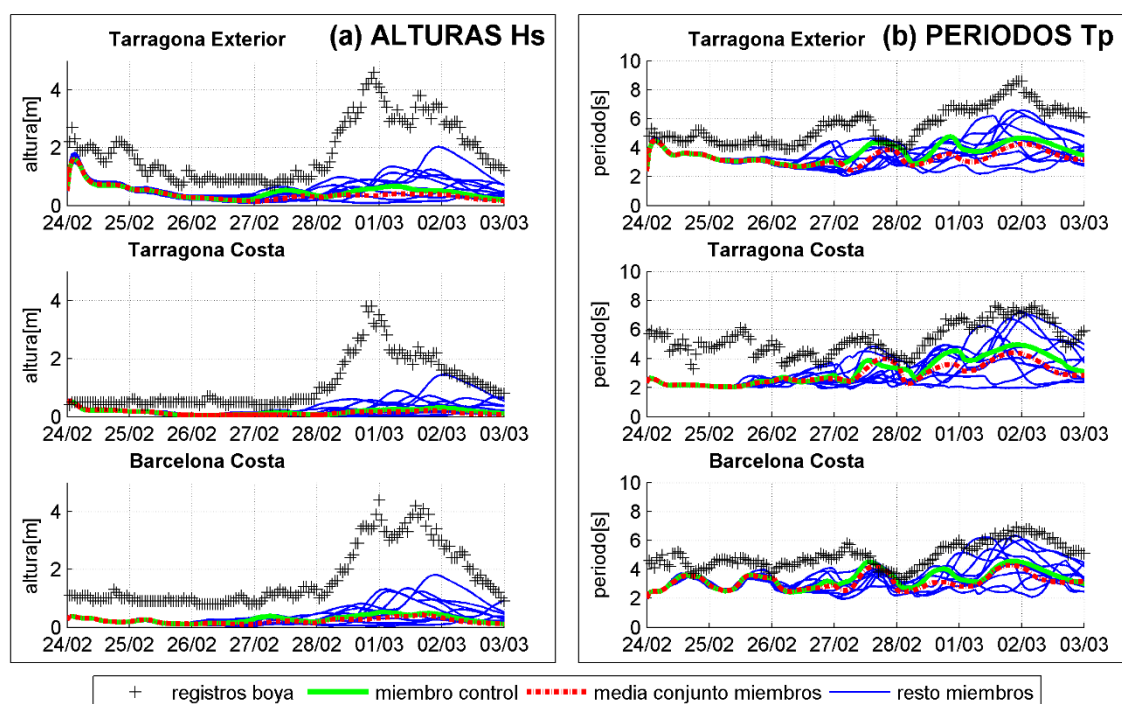


Figura 34: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 24/02/2013 para un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (Hs) y b) los periodos (Tp) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

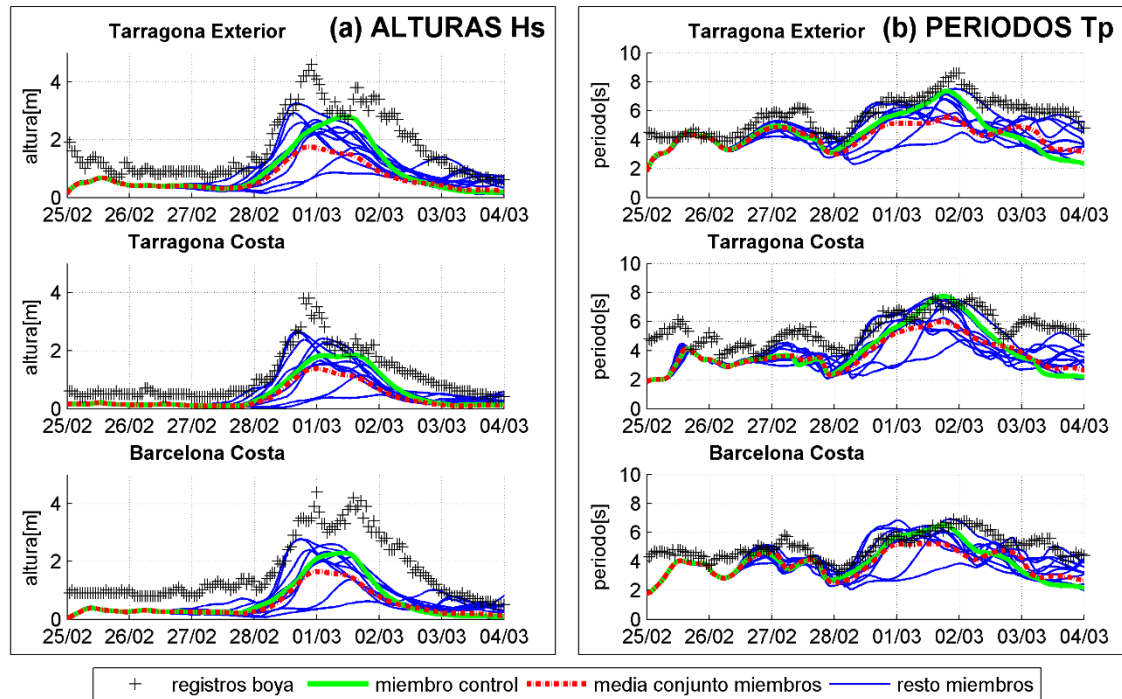


Figura 35: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 25/02/2013 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (Hs) y b) los periodos (Tp) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

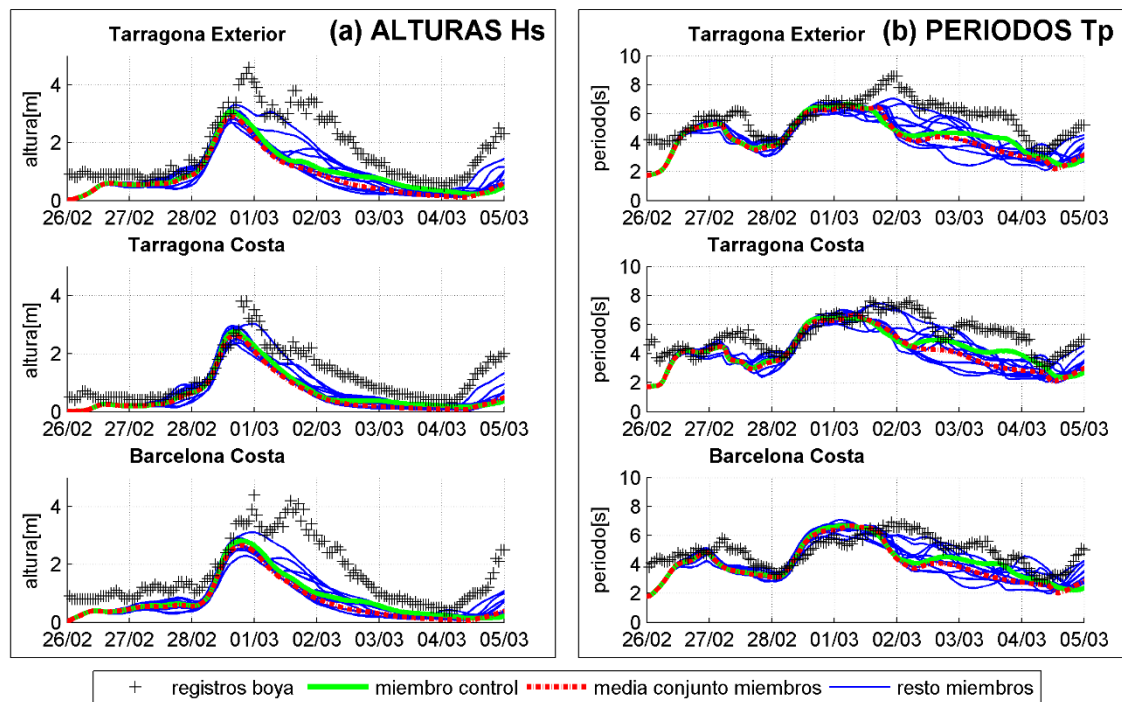


Figura 36: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 26/02/2013 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (Hs) y b) los periodos (Tp) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

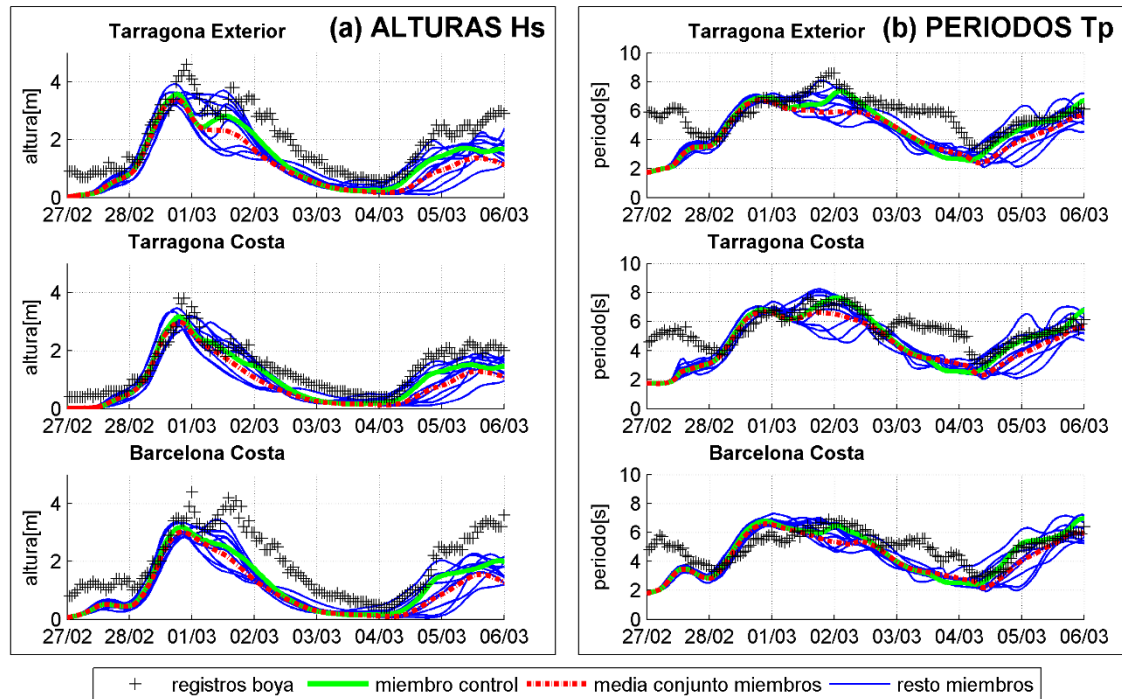


Figura 37: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 27/02/2013 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

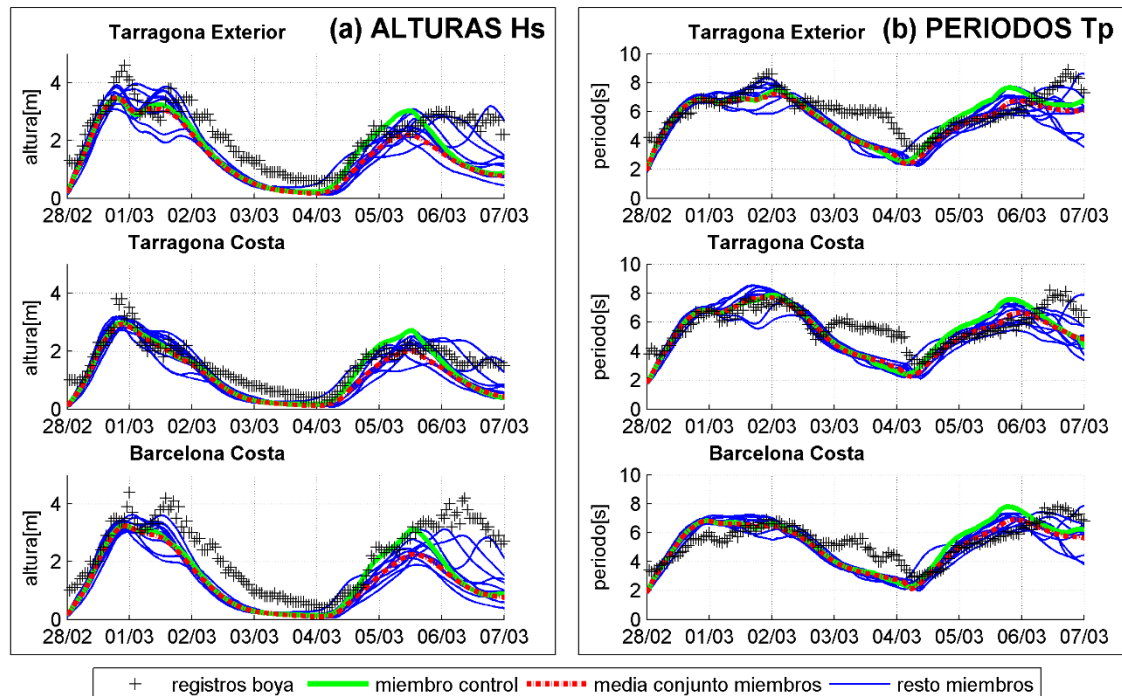


Figura 38: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 28/02/2013 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

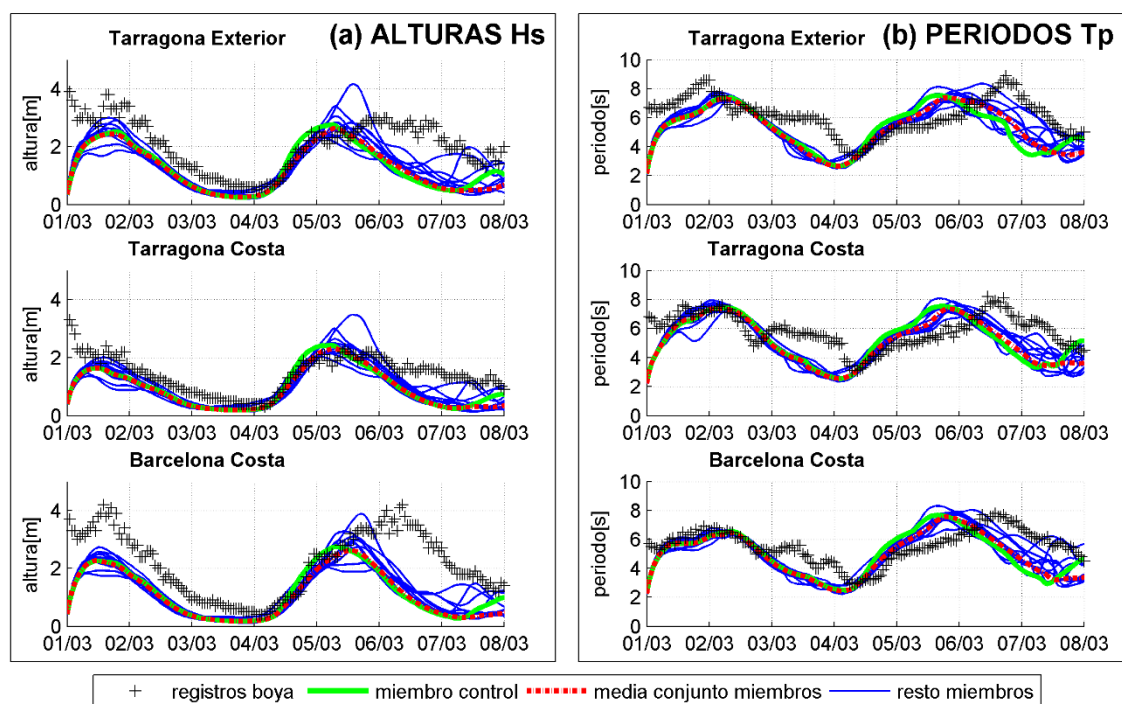


Figura 39: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 01/03/2013 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

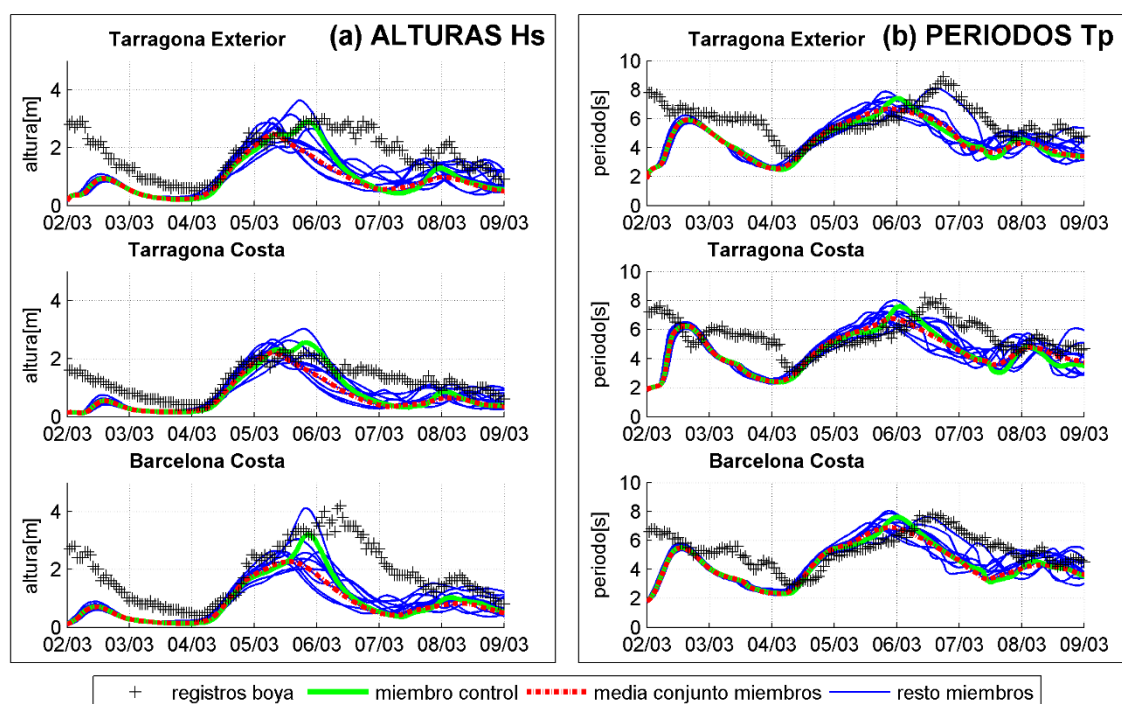


Figura 40: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 02/03/2013 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

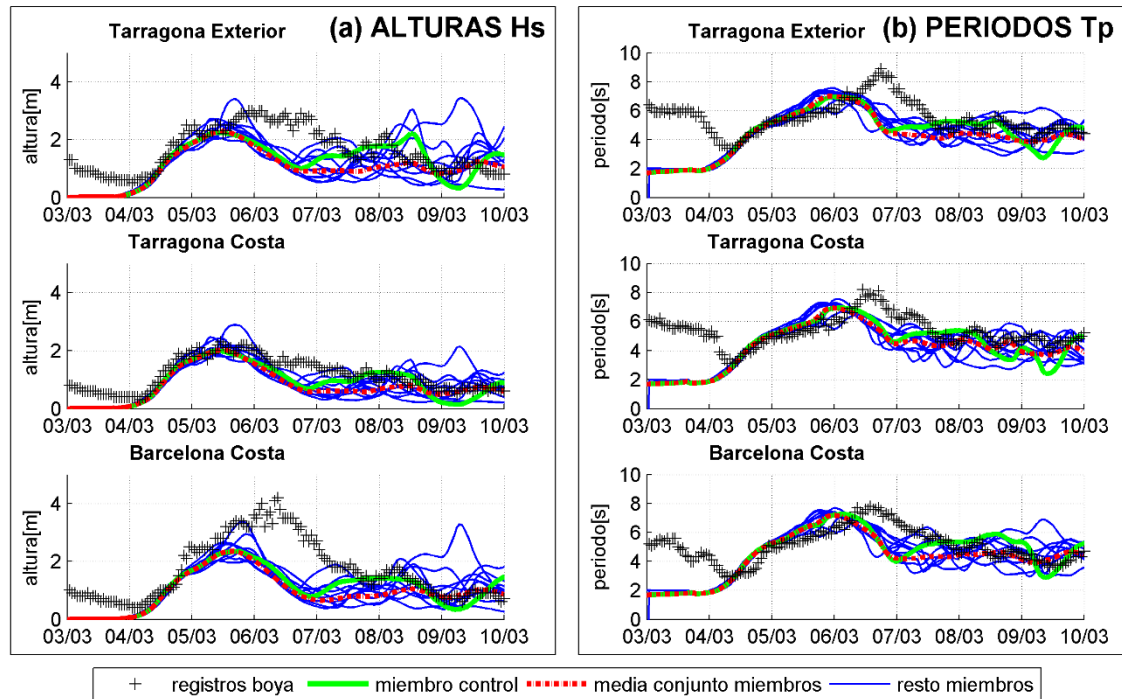


Figura 41: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 03/02/2013 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

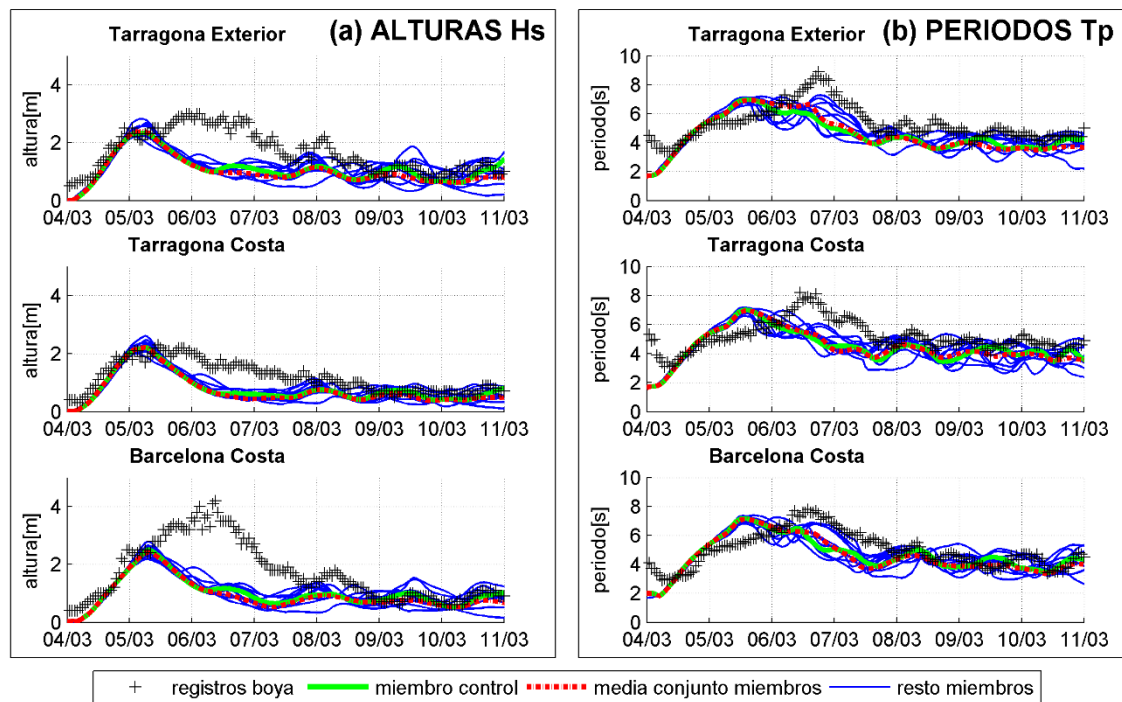


Figura 42: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 04/03/2013 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

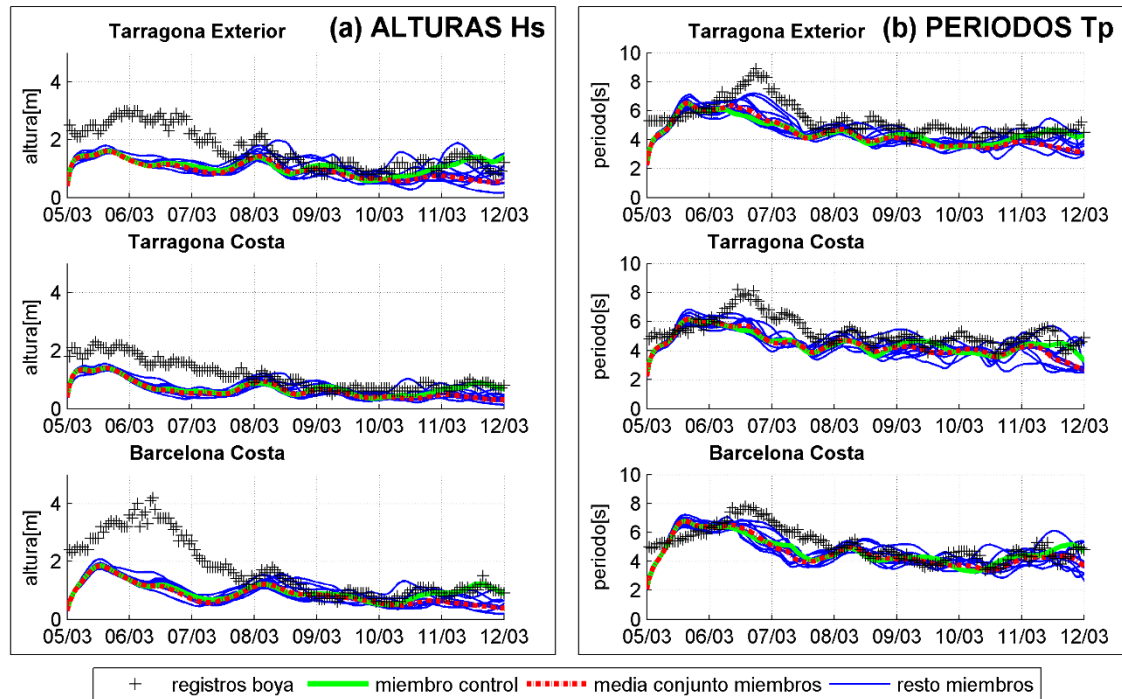


Figura 43: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 05/03/2013 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (Hs) y b) los periodos (Tp) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

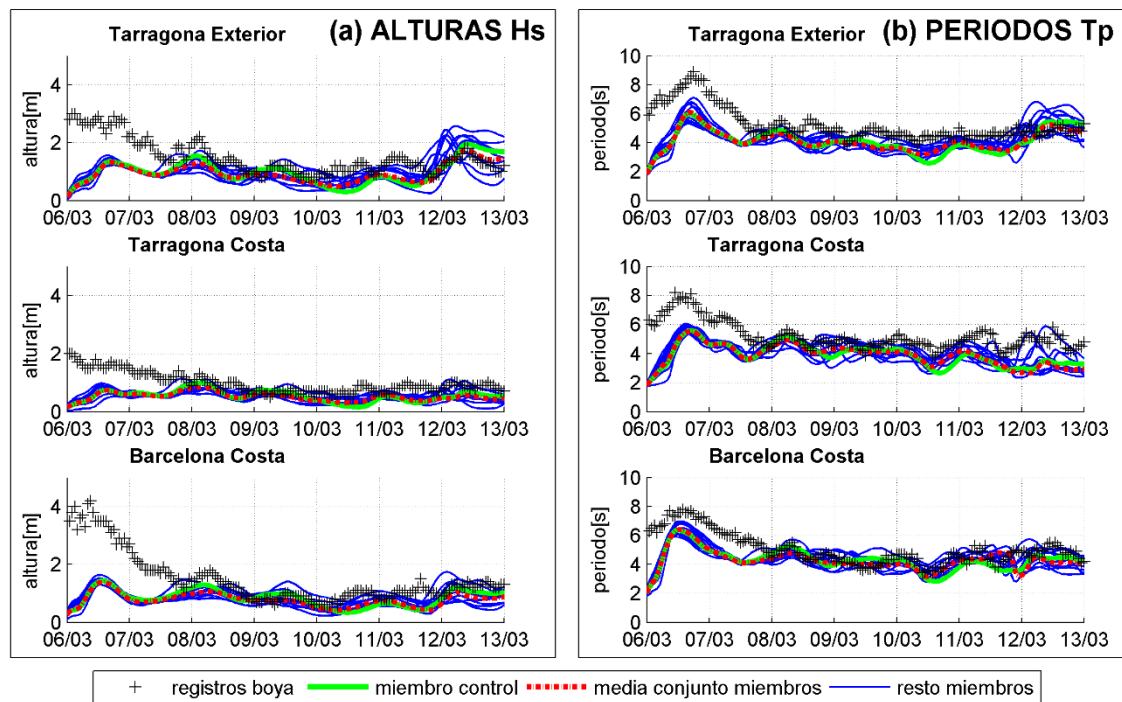


Figura 44: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 06/03/2013 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (Hs) y b) los periodos (Tp) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

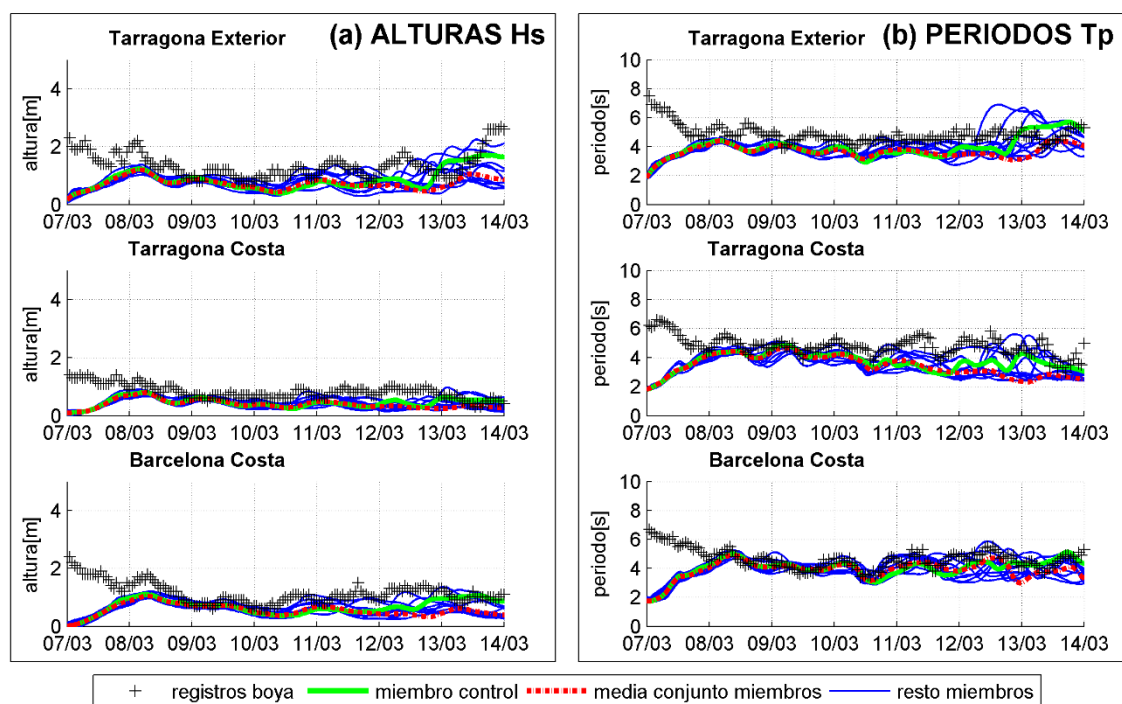


Figura 45: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 07/03/2013 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

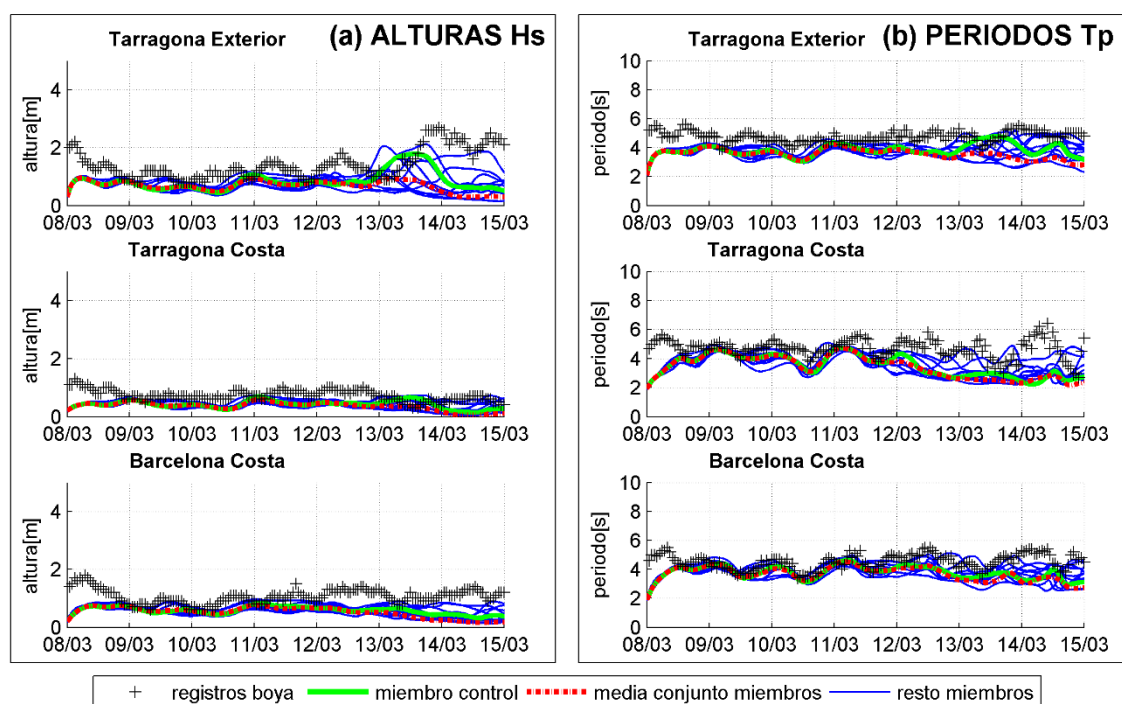


Figura 46: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 08/03/2013 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

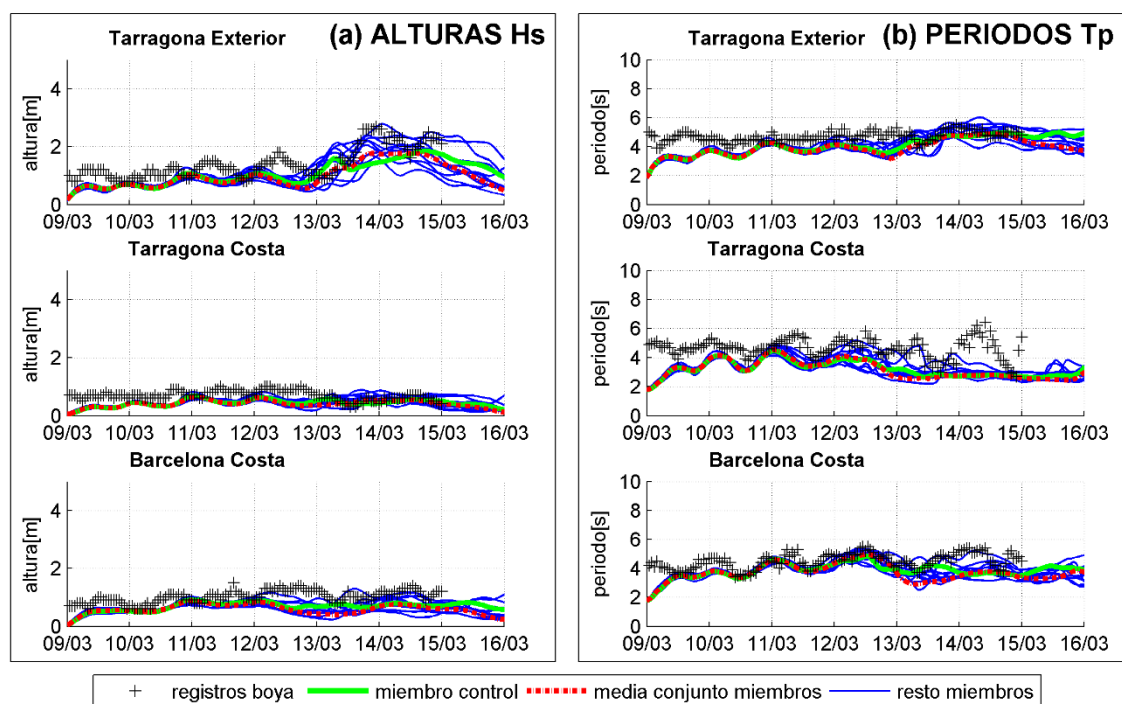


Figura 47: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 09/03/2013 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

5.2. EPISODIO DEL 21/01/2015 al 04/02/2015

Este episodio, que se muestra en la siguiente figura presenta un primer gran pico con alturas cercanas a los 6 metros alrededor del 25 de Enero en el cual centraremos nuestro análisis.

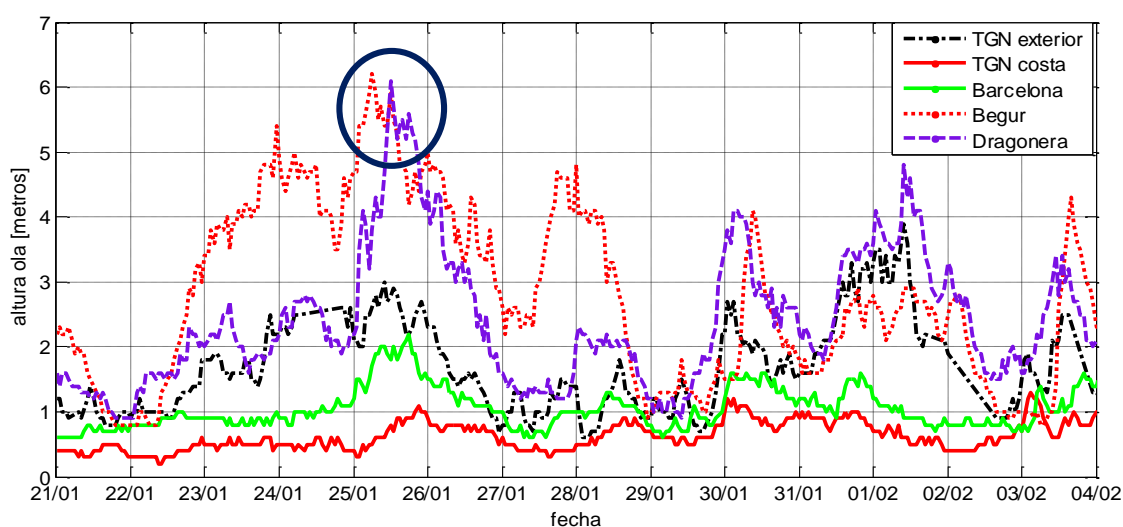


Figura 48: Registros de boyas del segundo periodo de estudio (21/01/2015 al 04/02/2015)

5.2.1 Mapas de altura de ola

En las figuras 49, 50, 51 y 52 se muestra la predicción generada con los datos de viento disponibles los días 21, 22, 23 y 24 de Enero del 2015 (que corresponden aproximadamente a 5, 4, 3 y 2 días de horizonte respectivamente) para el pico de tormenta.

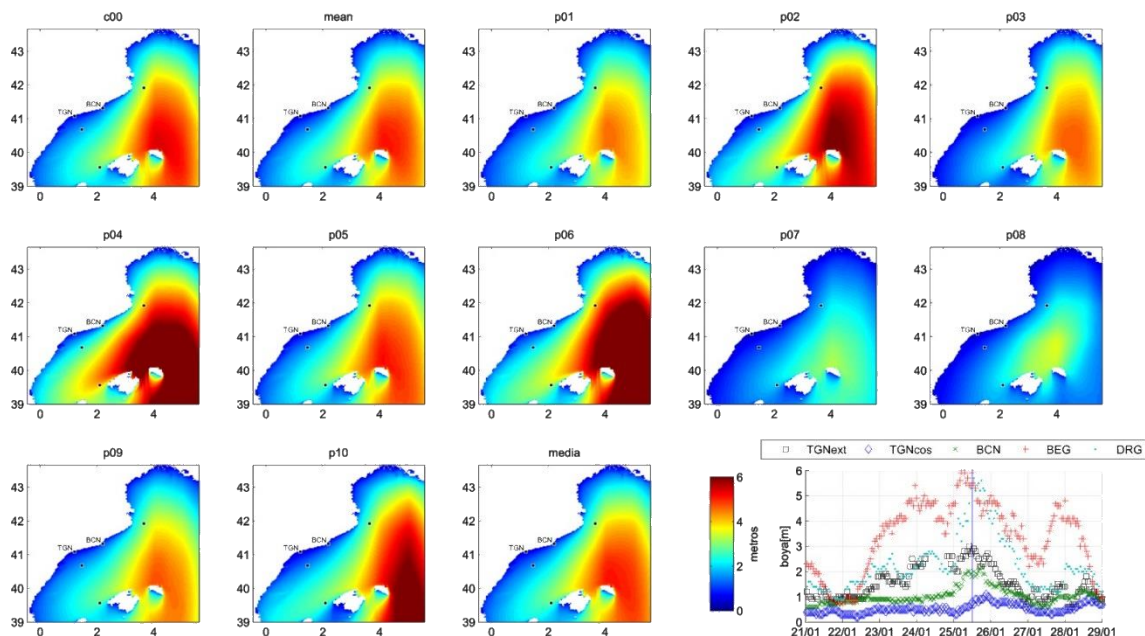


Figura 49: Mapas de alturas de olas de la predicción del pico de tormenta a partir de los datos de viento del día 21/01/2015. Se representan los diferentes miembros del conjunto: control (c00) y perturbaciones (p01,..., p10) del conjunto, además de la predicción generada por la media del conjunto de miembros del viento ("mean"). Adicionalmente se representa la media obtenida a partir de las predicciones del oleaje ("media"). La última gráfica corresponde a las alturas registradas en las boyas.

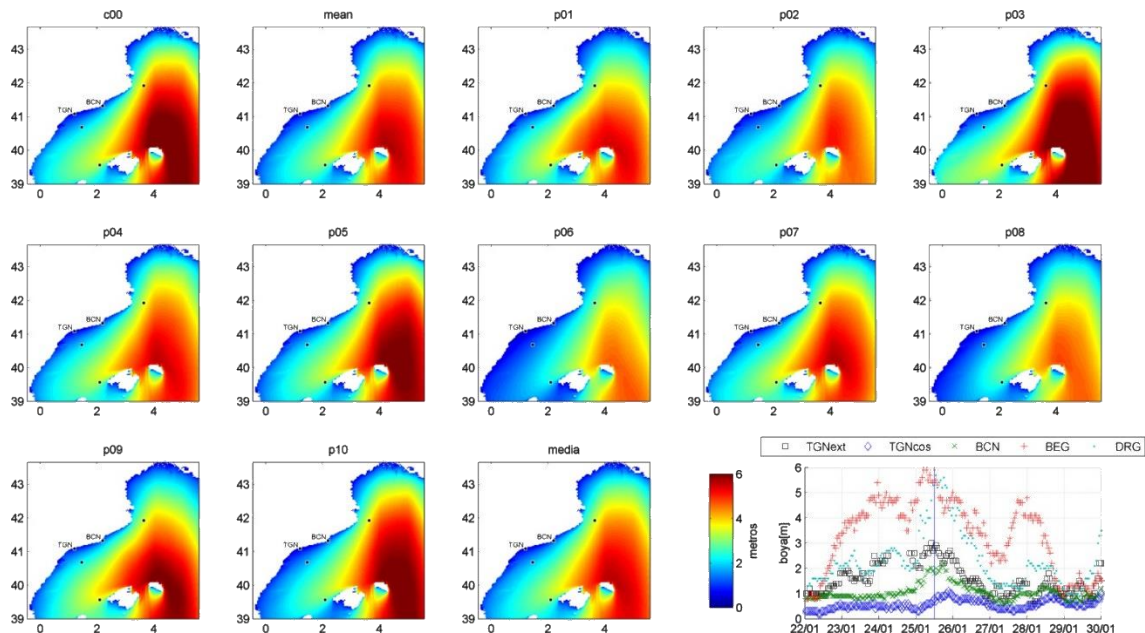


Figura 50: Mapas de alturas de olas de la predicción del pico de tormenta a partir de los datos de viento del día 22/02/2015. Se representan los diferentes miembros del conjunto: control (c00) y perturbaciones (p01,..., p10) del conjunto, además de la predicción generada por la media del conjunto de miembros del viento ("mean"). Adicionalmente se representa la media obtenida a partir de las predicciones del oleaje ("media"). La última gráfica corresponde a las alturas registradas en las boyas.

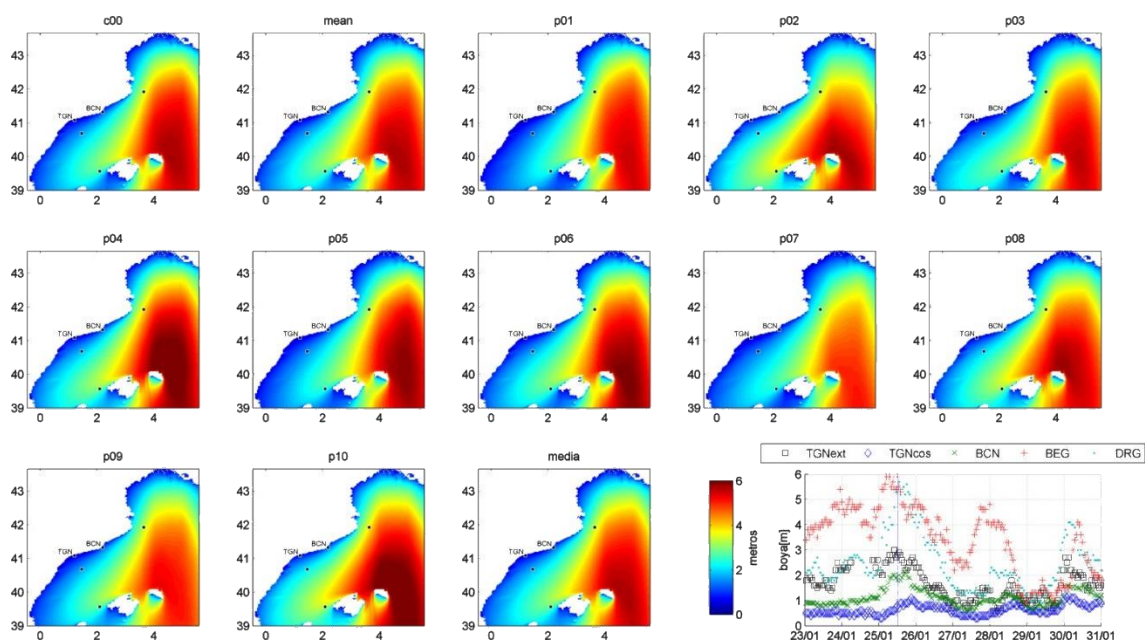


Figura 51: Mapas de alturas de olas de la predicción del pico de tormenta a partir de los datos de viento del día 23/02/2015. Se representan los diferentes miembros del conjunto: control (c00) y perturbaciones (p01,..., p10) del conjunto, además de la predicción generada por la media del conjunto de miembros del viento ("mean"). Adicionalmente se representa la media obtenida a partir de las predicciones del oleaje ("media"). La última gráfica corresponde a las alturas registradas en las boyas.

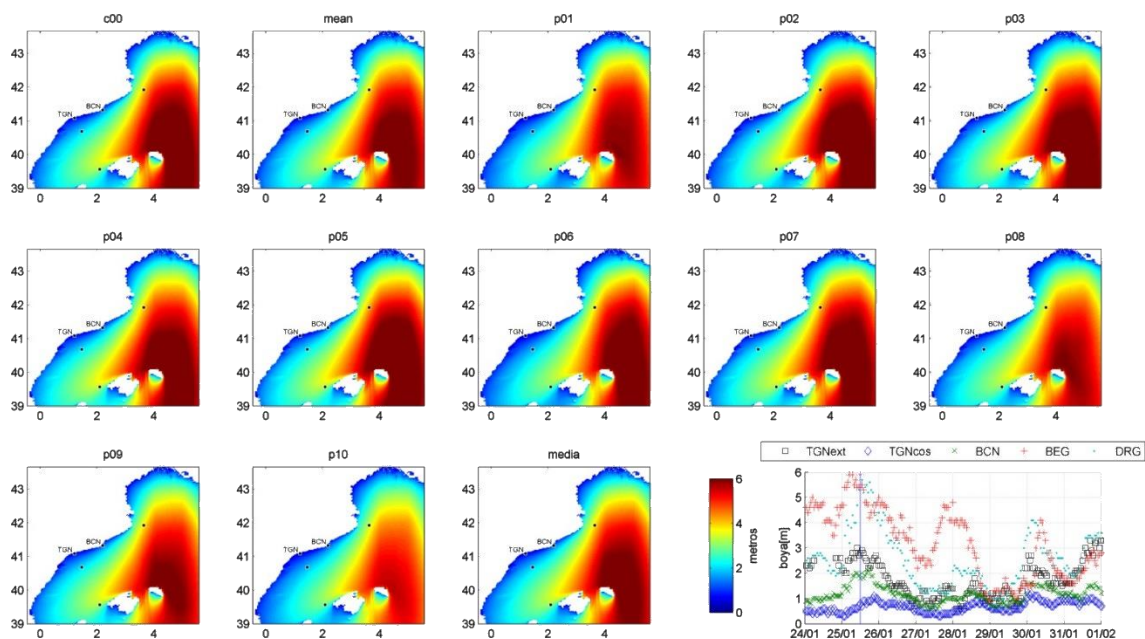


Figura 52: Mapas de alturas de olas de la predicción del pico de tormenta a partir de los datos de viento del día 24/02/2015. Se representan los diferentes miembros del conjunto: control (c00) y perturbaciones (p01,..., p10) del conjunto, además de la predicción generada por la media del conjunto de miembros del viento ("mean"). Adicionalmente se representa la media obtenida a partir de las predicciones del oleaje ("media"). La última gráfica corresponde a las alturas registradas en las boyas.

Como se ha visto en las gráficas anteriores en este caso el temporal se capta desde una predicción temprana y todos los miembros coinciden en la predicción

5.2.2 Mapas de probabilidad

En las figuras 53, 54, 55 y 56 se muestra la predicción generada con los datos de viento disponibles los días 21, 22, 23 y 24 de Enero del 2015 (que corresponden aproximadamente a 5, 4, 3 y 2 días de horizonte respectivamente) para el pico de tormenta.

Como en los casos anteriores (temporales del 2013) existe una infravaloración de la probabilidad de ocurrencia de oleajes altos, que se puede observar en las gráficas comparando los mapas con la serie temporal.

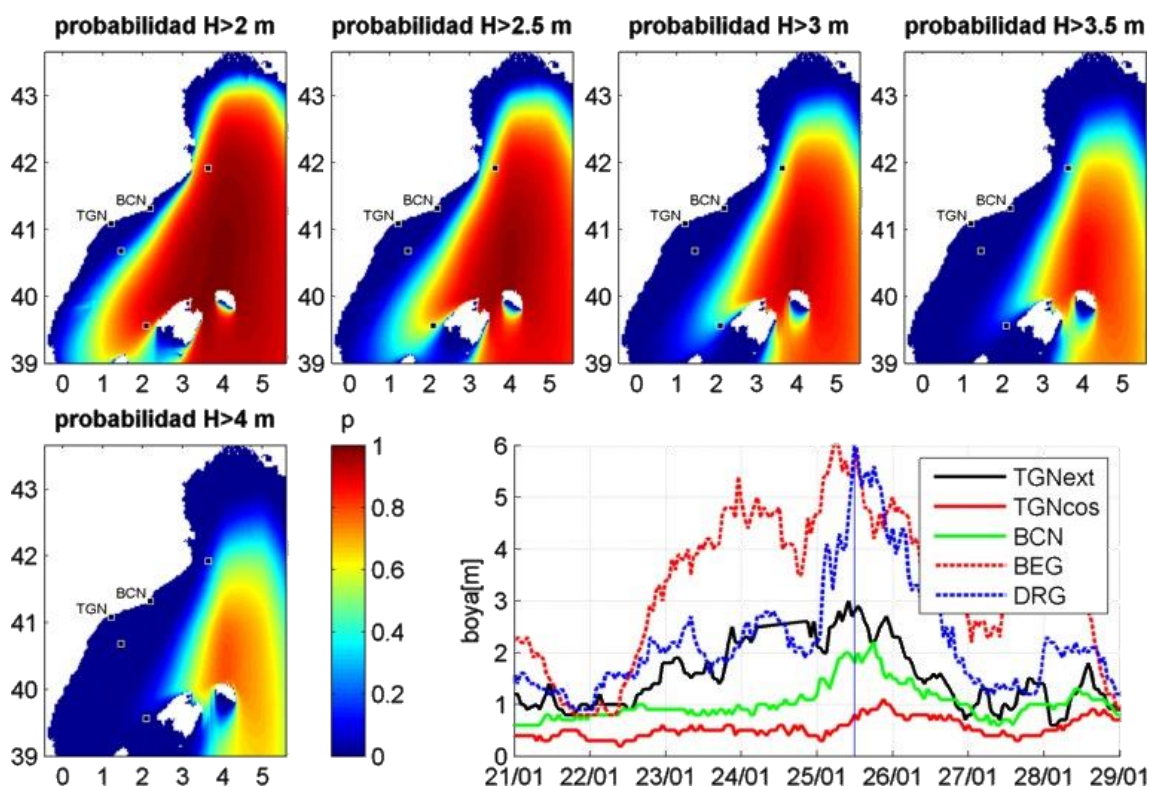


Figura 53: Mapas de probabilidades de excedencia de una determinada altura de ola (2,2.5,3,3.5 y 4 metros) a partir de los datos de viento correspondientes al día 21/01/2015. También se representan los registros de oleaje de las boyas donde la línea vertical indica el instante temporal que se representa en los mapas.

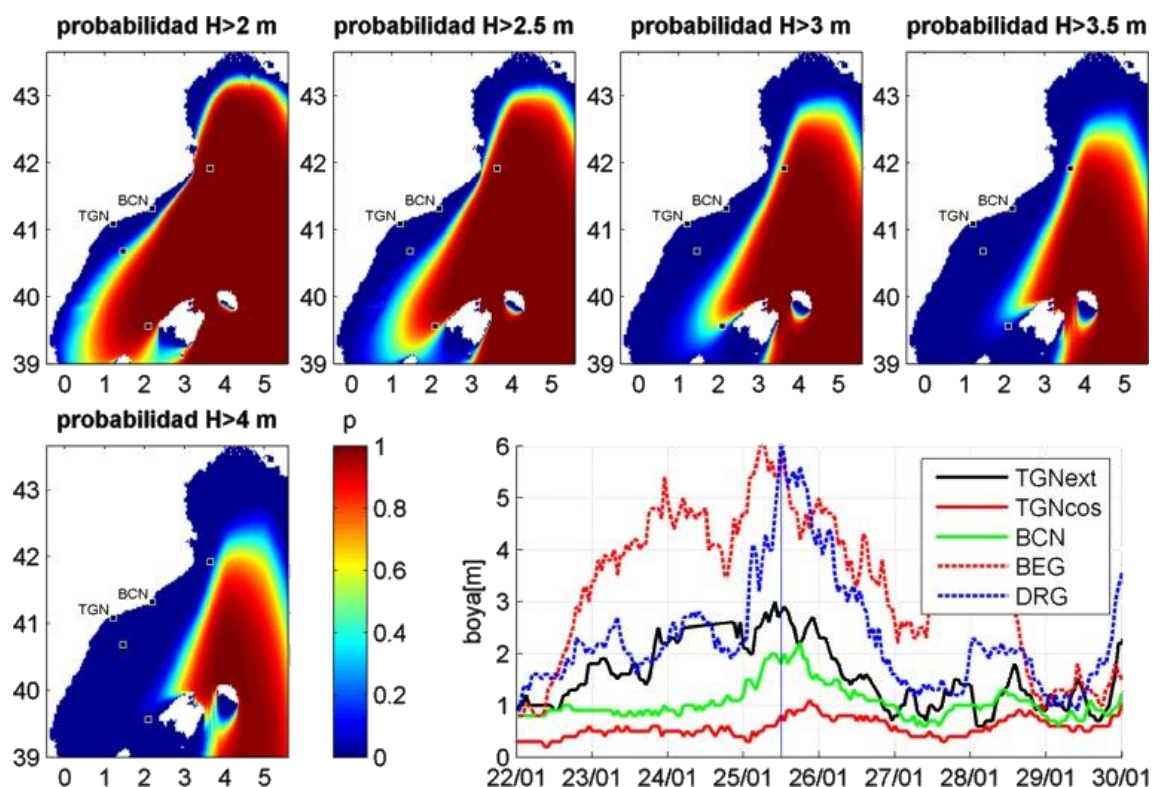


Figura 54: Mapas de probabilidades de excedencia de una determinada altura de ola (2,2.5,3,3.5 y 4 metros) a partir de los datos de viento correspondientes al día 22/01/2015. También se representan los registros de oleaje de las boyas donde la línea vertical indica el instante temporal que se representa en los mapas.

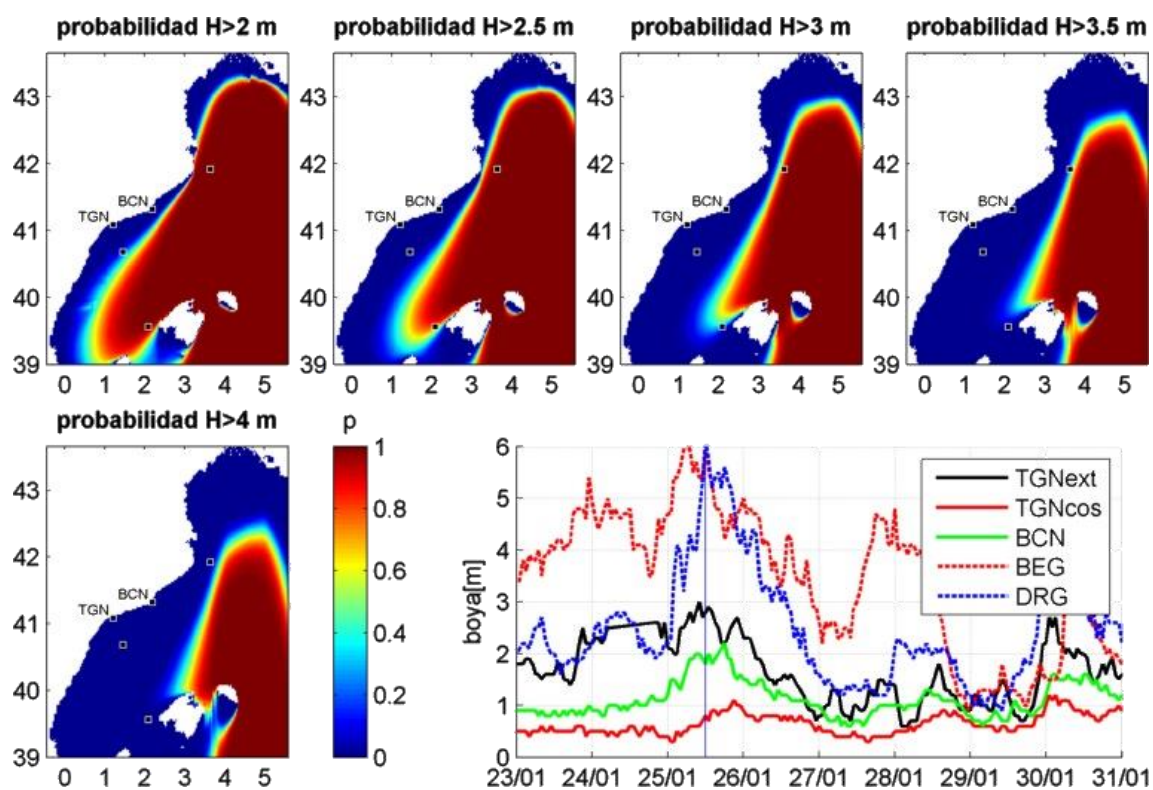


Figura 55: Mapas de probabilidades de excedencia de una determinada altura de ola (2,2.5,3,3.5 y 4 metros) a partir de los datos de viento correspondientes al día 23/01/2015. También se representan los registros de oleaje de las boyas donde la línea vertical indica el instante temporal que se representa en los mapas.

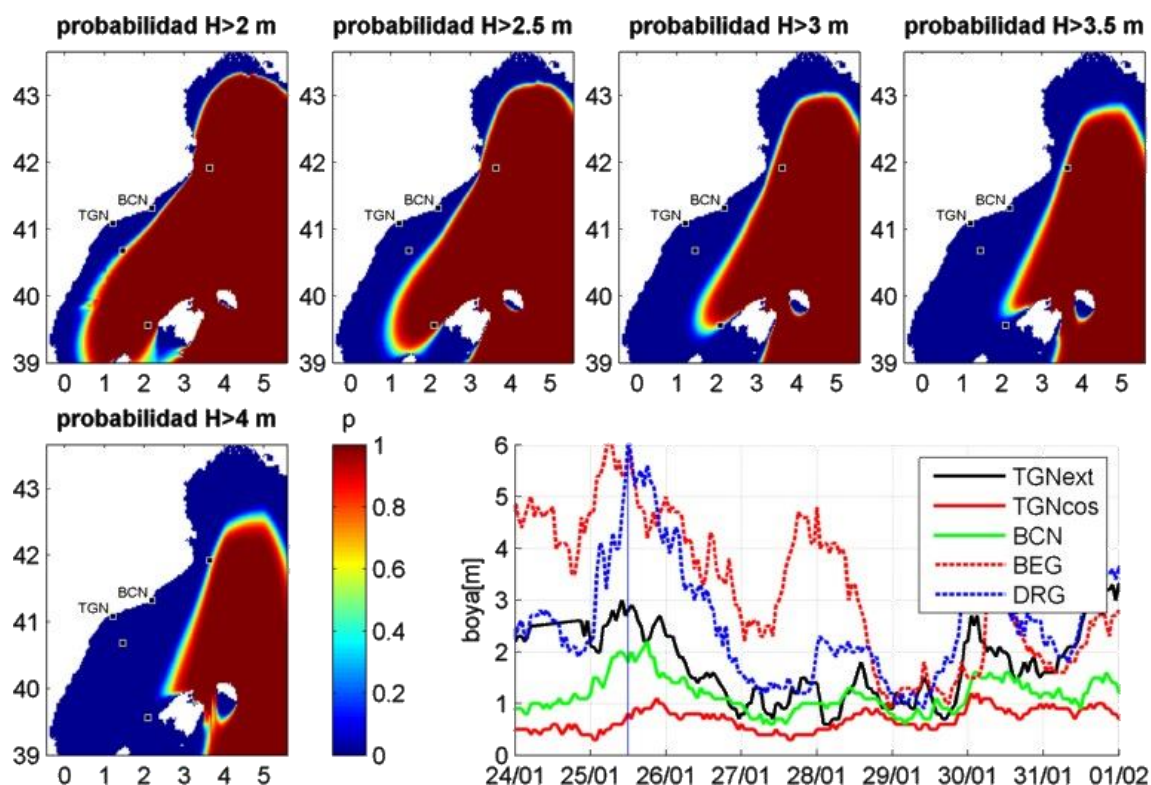


Figura 56: Mapas de probabilidades de excedencia de una determinada altura de ola (2,2.5,3,3.5 y 4 metros) a partir de los datos de viento correspondientes al día 24/01/2015. También se representan los registros de oleaje de las boyas donde la línea vertical indica el instante temporal que se representa en los mapas.

5.2.3 Series temporales de altura y periodo de oleaje

En las figuras 57 a 71 se observan los casos correspondientes a las predicciones generadas con los datos de viento disponibles del día 21/01/2015 al día 04/02/2013 en las cuales se representan las series temporales de los diferentes miembros comparándolos con el registro de las boyas. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boyas, la línea verde al miembro control, la línea rojo discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea más fina

Como en el caso presentado anteriormente (año 2013) se ha resumido su comportamiento en la siguiente tabla que se presenta a continuación. En la tabla se muestra el día en que se ha generado la predicción, el horizonte temporal hasta el (los) temporale(s) que aparecen durante el periodo considerado y la evaluación de la captación del temporal por parte del modelo (que si existe un temporal sea captado y que si se predice que exista). También se presenta la evaluación de la fidelidad de la altura del oleaje y el periodo, así como la duración del temporal. Estas consideraciones se realizan sobre el conjunto global de todas las boyas.

Día	Horizonte temporales	Captación temporales	Fidelidad altura	Fidelidad periodo	Duración temporal
21/01/2015	4 días	Regular	Mal	Bien	Mal
22/01/2015	3 días	Regular	Subestima	Bien	Corta
23/01/2015	2 día	Mal	Mal	Bien	Mal
24/01/2015	1 día	Bien	Subestima	Bien	Corta
25/01/2015	3 días	Bien	Subestima	Bien	Corta
26/01/2015	2 días	Bien	Subestima	Bien	Corta
27/01/2015	1 día	Bien	Subestima	Bien	Corta
28/01/2015	No hay	Bien	Bien	Bien	Bien
29/01/2015	3 días	Bien	Bien	Bien	Bien
30/01/2015	2 días	Bien	Bien	Bien	Bien
31/01/2015	1 día	Bien	Subestima	Bien	Bien
01/02/2015	3 días	Mal	Mal	Bien	Mal
02/02/2015	2 días	Mal	Mal	Mal	Mal
03/02/2105	1 día	Regular	Subestima	Regular	Corta
04/02/2015	0 días	Regular	Subestima	Regular	Corta

Tabla 5: Evaluación de las predicciones generadas cada día. Para la predicción generada en un día determinado se muestra el horizonte temporal de la tormenta y la evaluación de la captación del temporal, de la altura del oleaje, del periodo y de la duración del temporal.

A partir de los resultados de esta tabla se desprende que en general la captación de los temporales es buena, pero sin embargo existe hay una subestimación de las alturas del oleaje. Esta subestimación afecta además a la duración predicha de los temporales, que en general es demasiado corta. Si se observan con más detalle las gráficas se aprecia que la duración más reducida de los temporales afecta principalmente al final del temporal, mientras que por otra parte la rampa de subida al inicio del temporal es captada con mucha mejor precisión. Por otra parte el periodo del oleaje es predicho con una precisión mucho más elevada que la altura del oleaje, tal como se puede observar en las gráficas.

Por otra parte se observa que cuando el temporal es demasiado cercano al día en que se genera la predicción (horizontes temporales menores de 48 horas) aparecen errores. Esto es debido a que hay que tener en cuenta que SWAN necesita un tiempo para inicializarse completamente ya que parte de un arranque en “frio” (con condiciones iniciales de mar en calma).

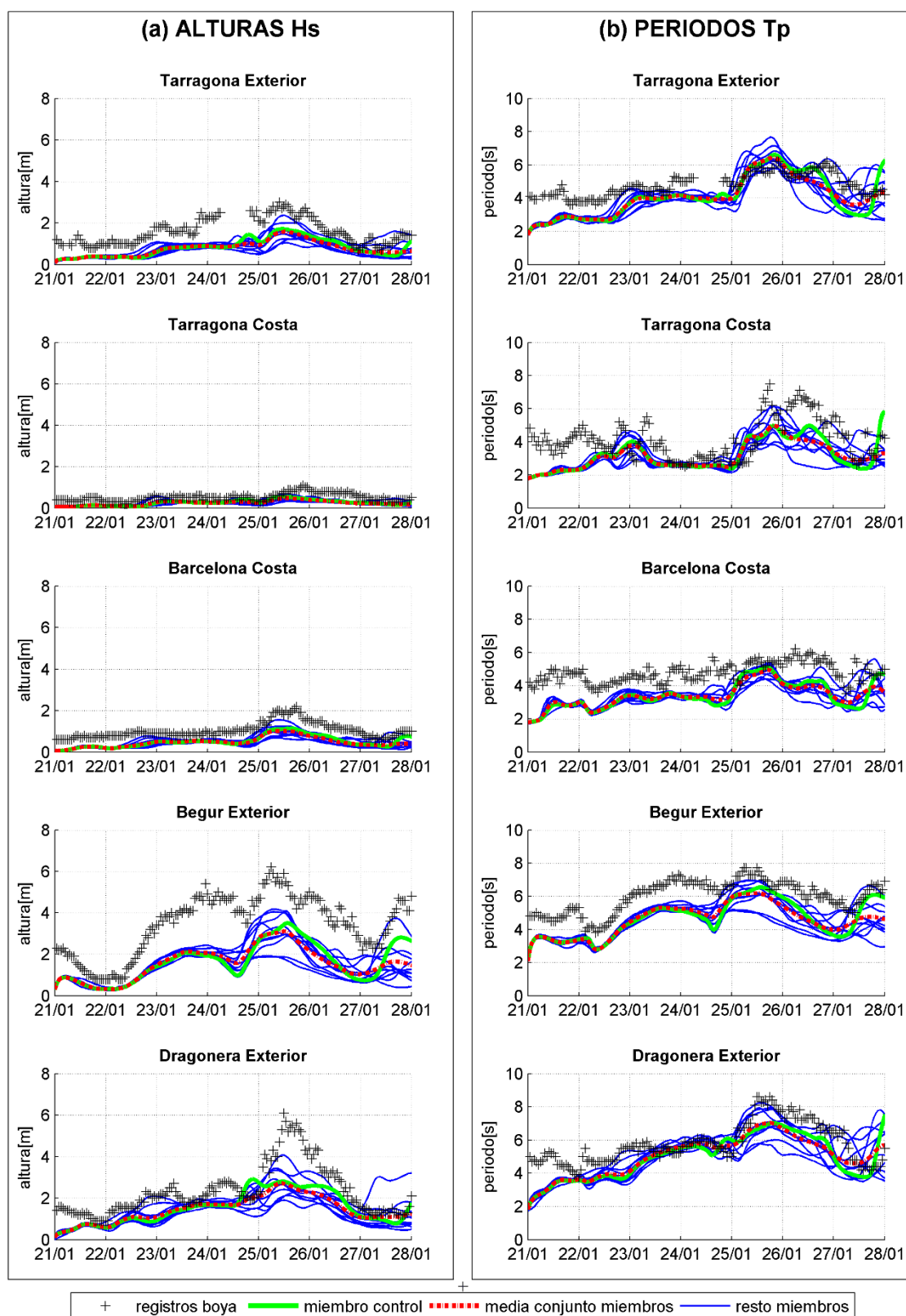


Figura 57: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 21/01/2015 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

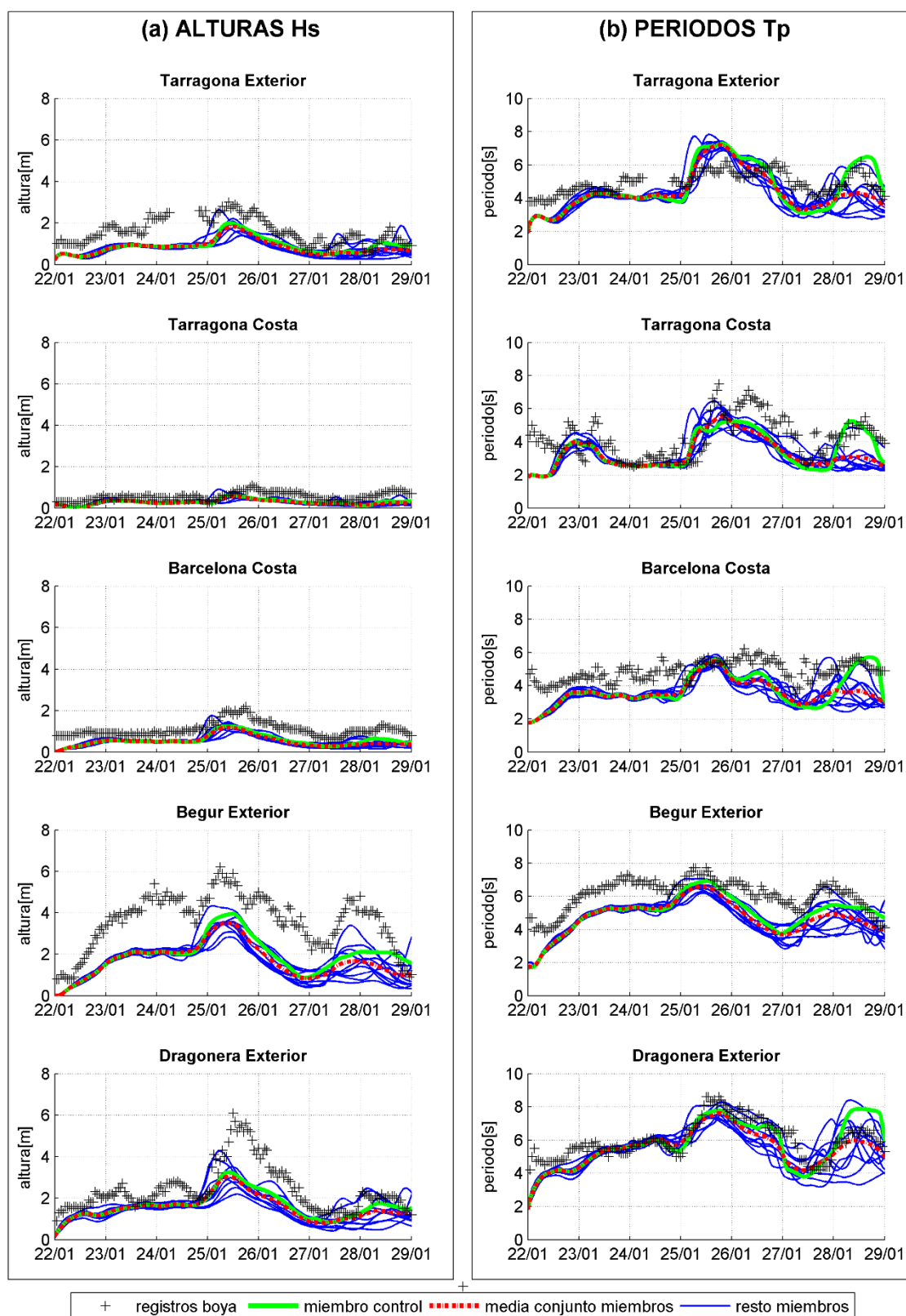


Figura 58: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 22/01/2015 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

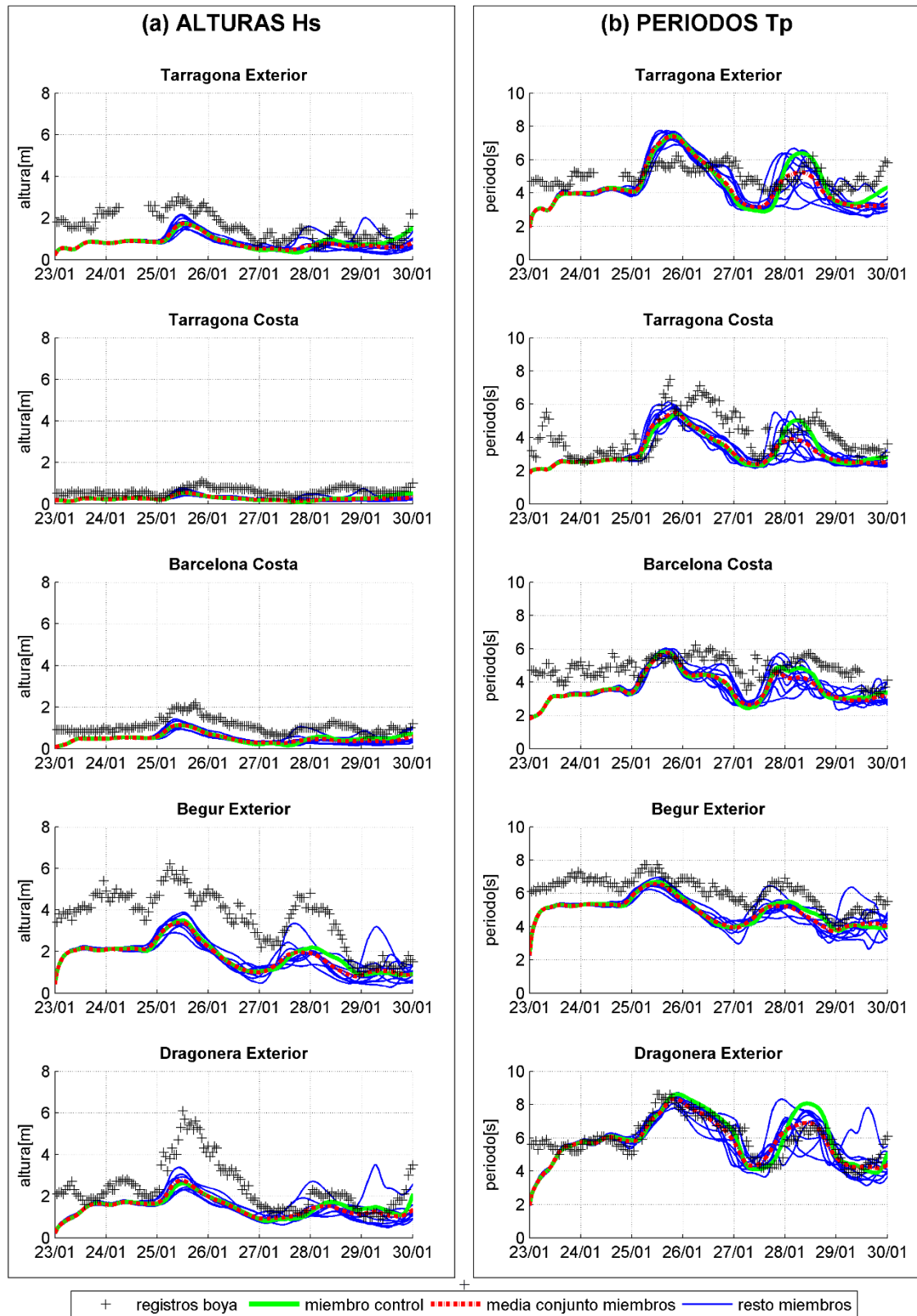


Figura 59: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 23/01/2015 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en la boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

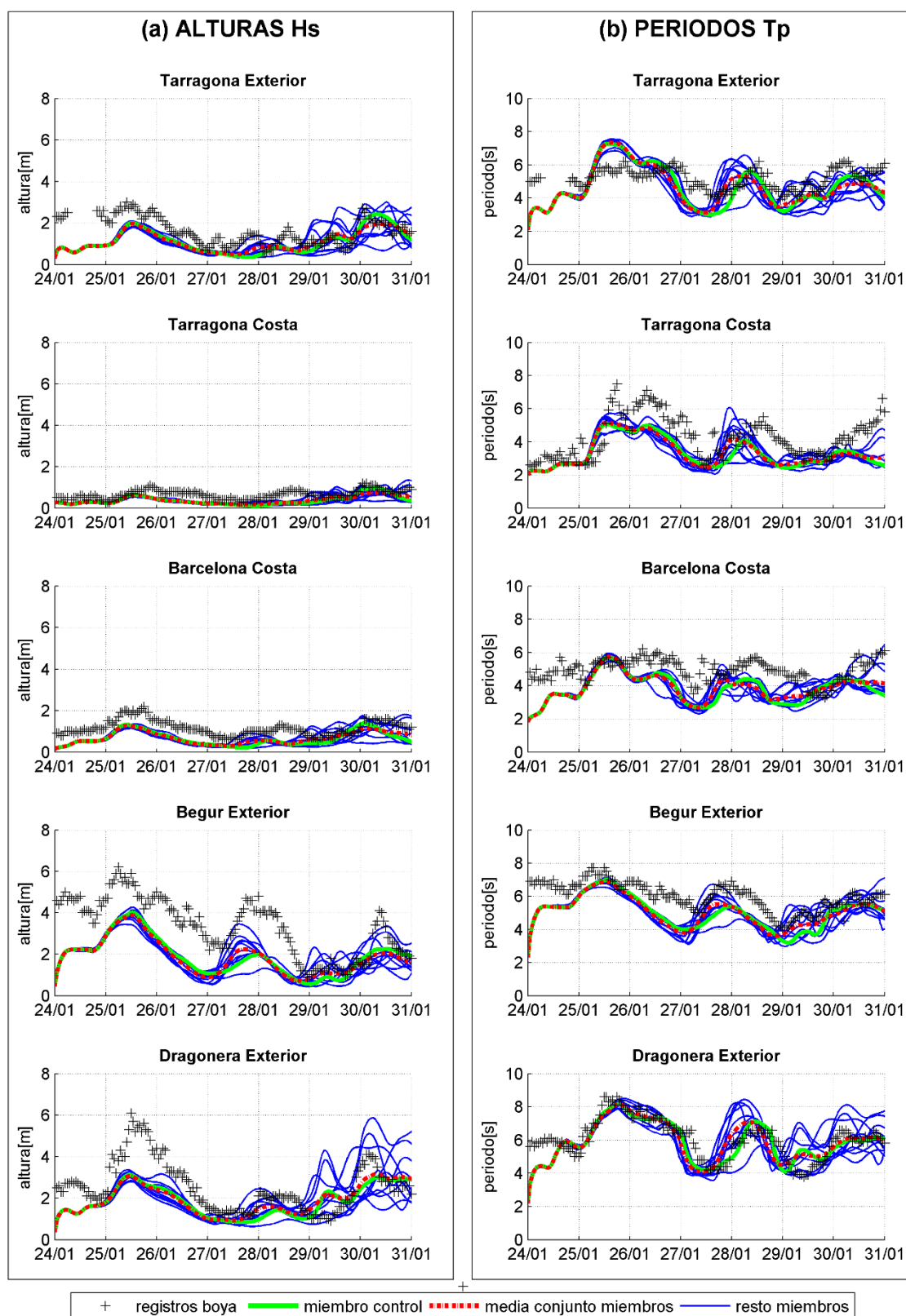


Figura 60: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 24/01/2015 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

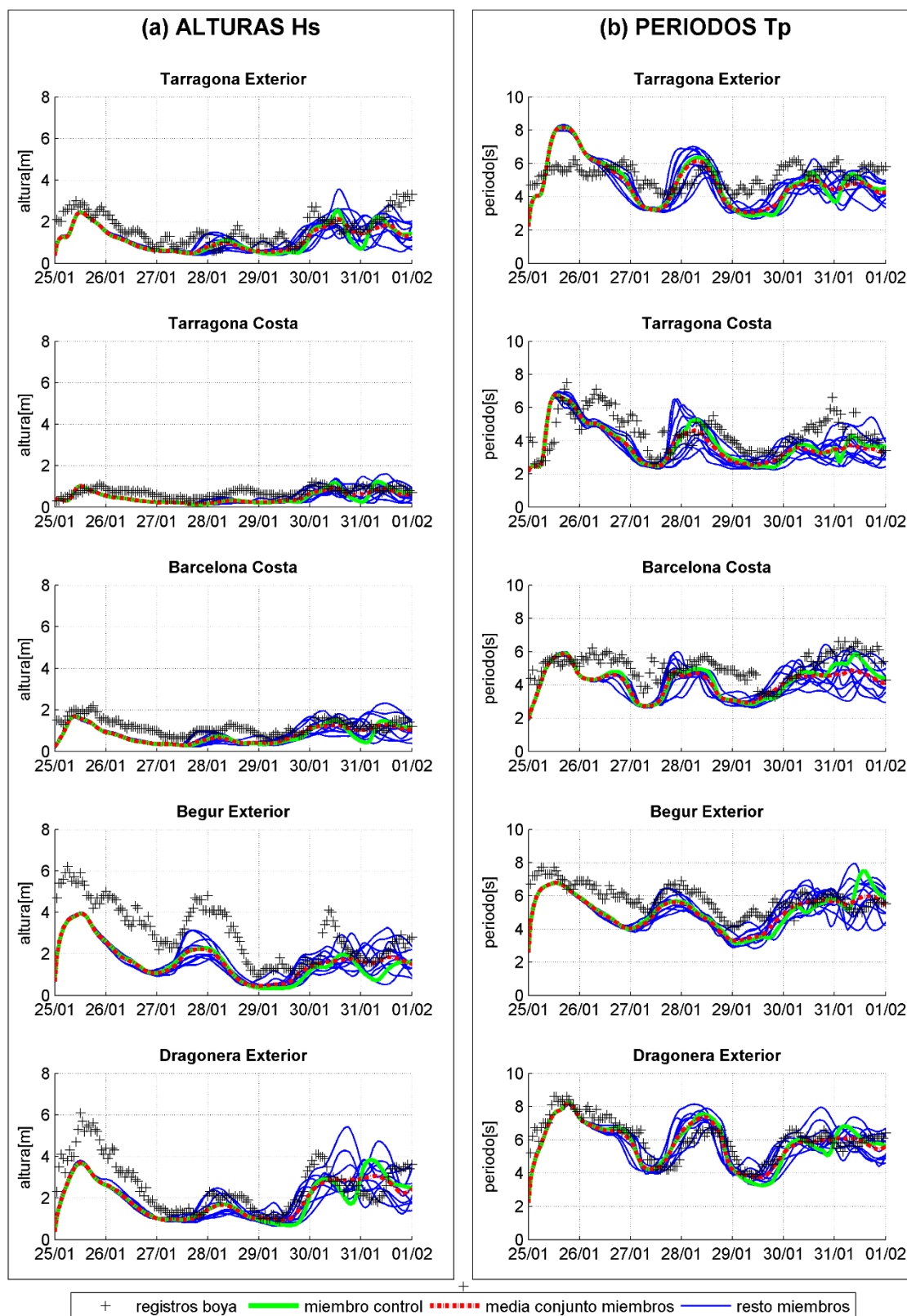


Figura 61: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 25/01/2015 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

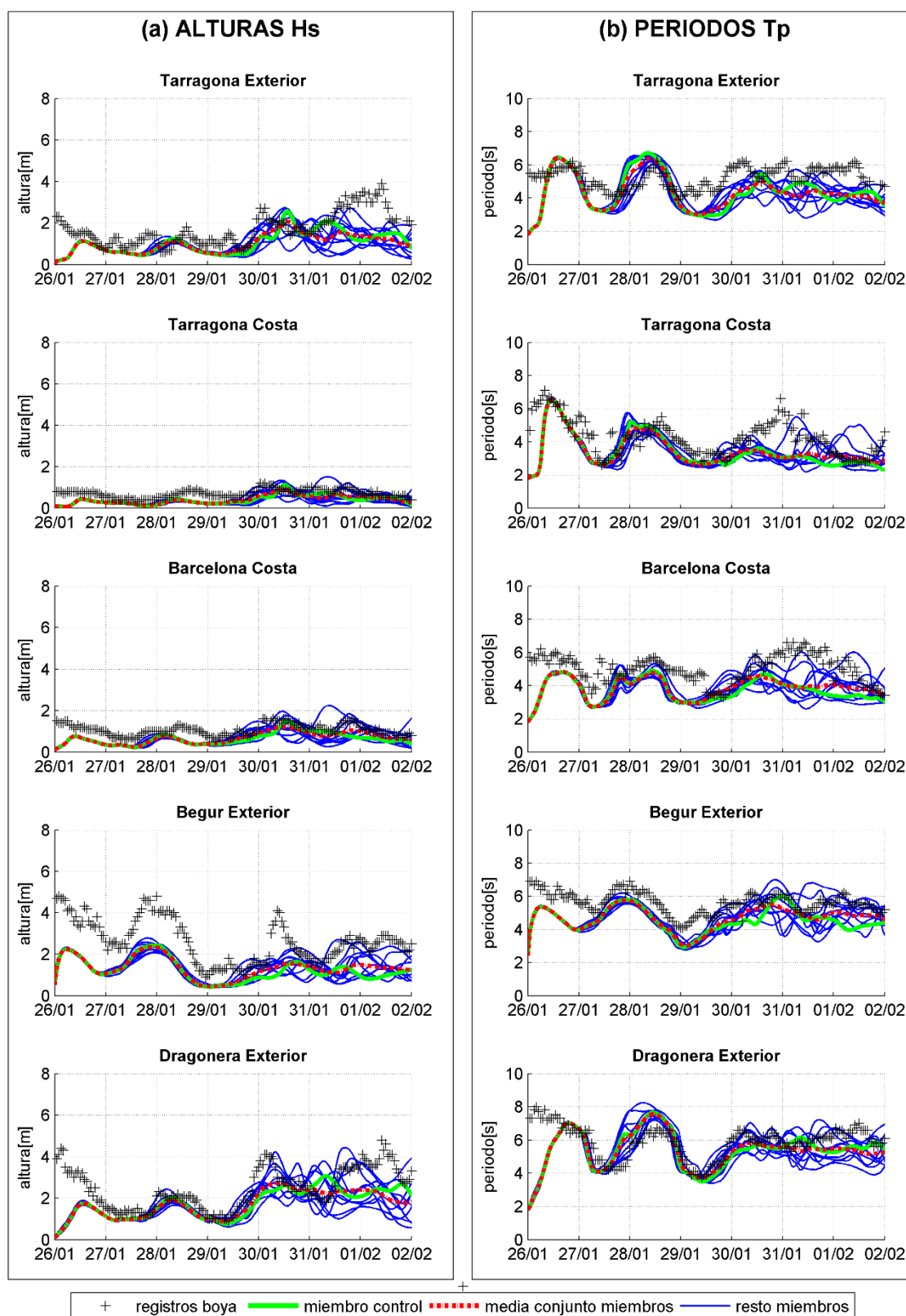


Figura 62: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 26/01/2015 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

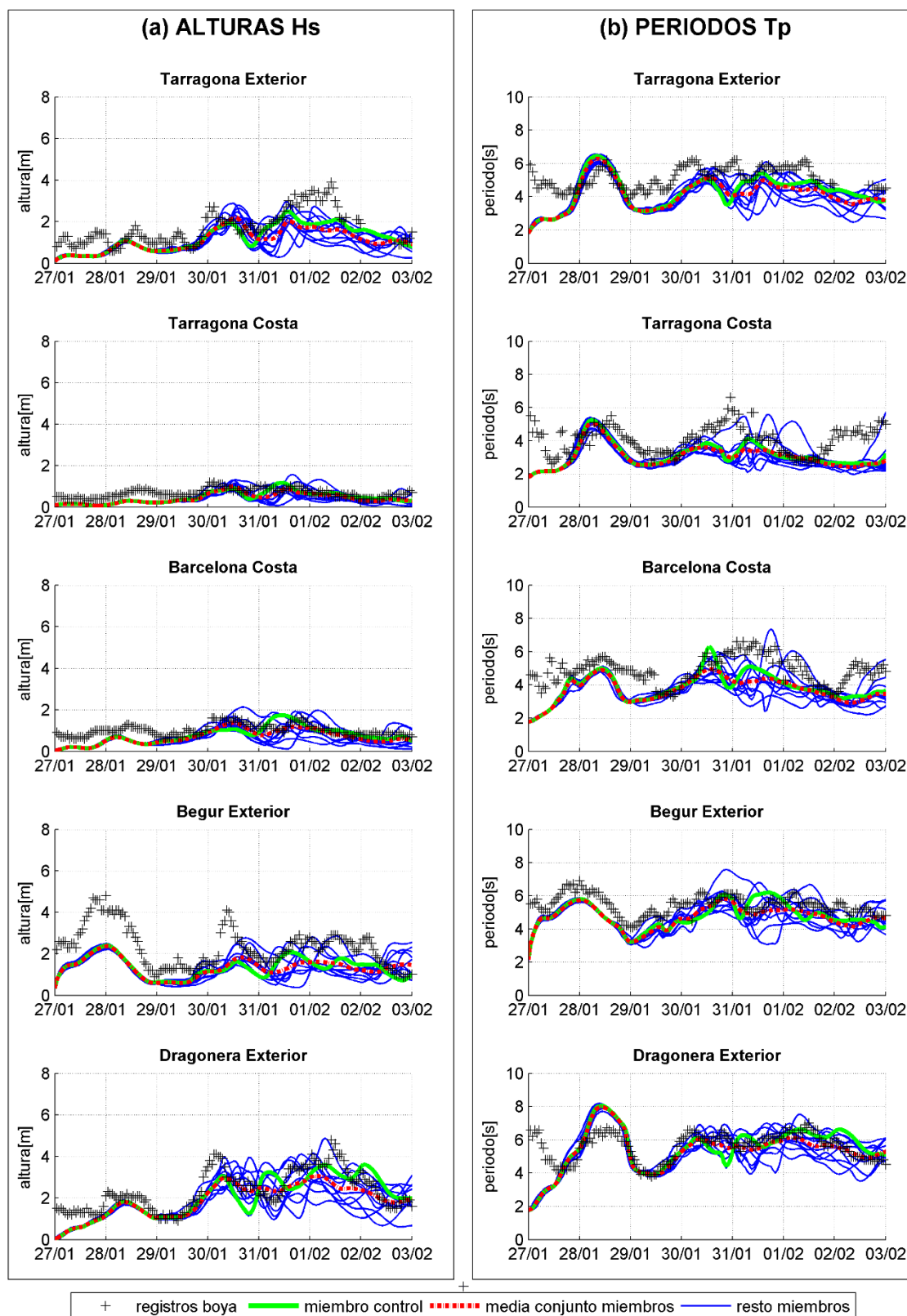


Figura 63: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 27/01/2015 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

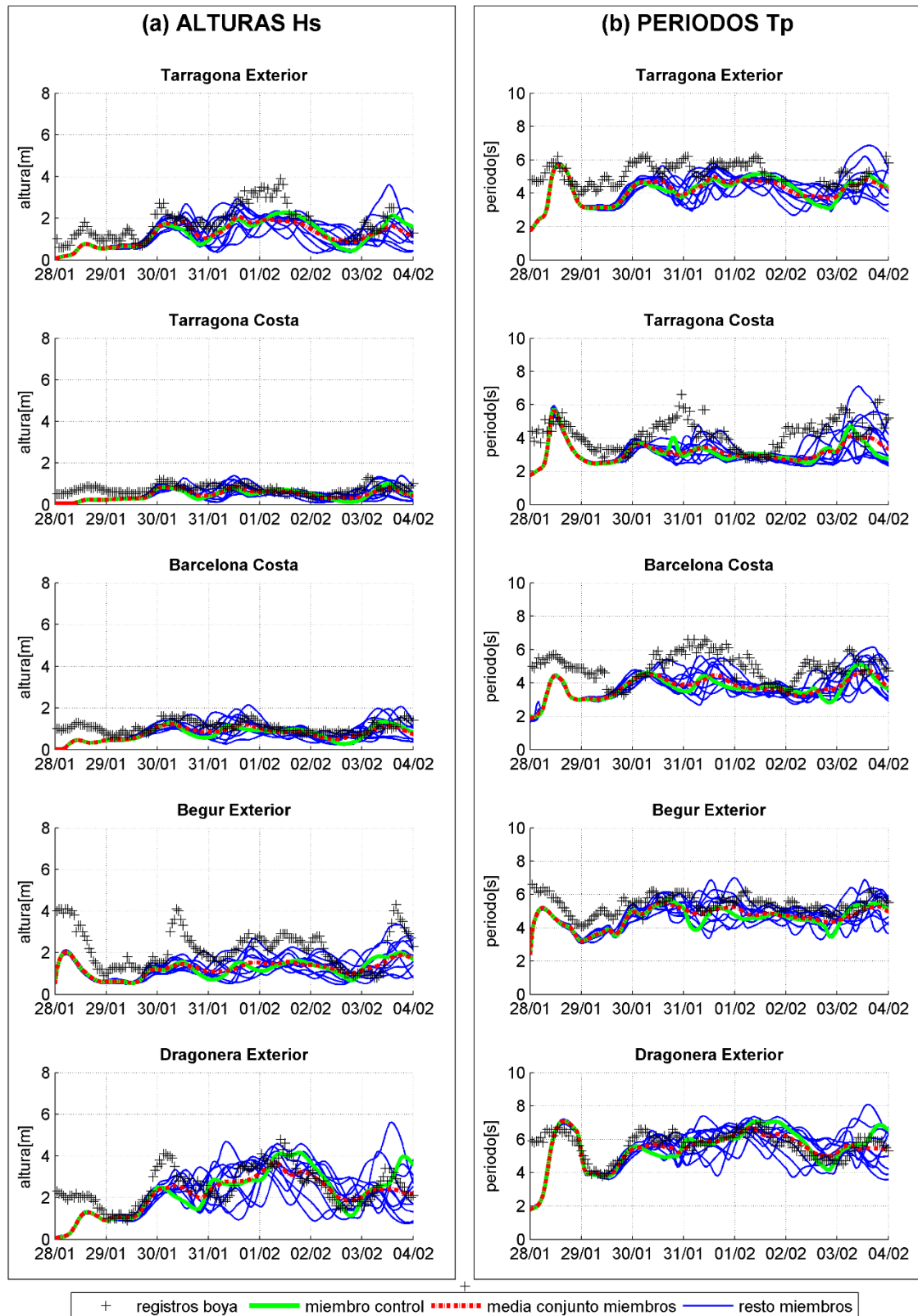


Figura 64: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 28/01/2015 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

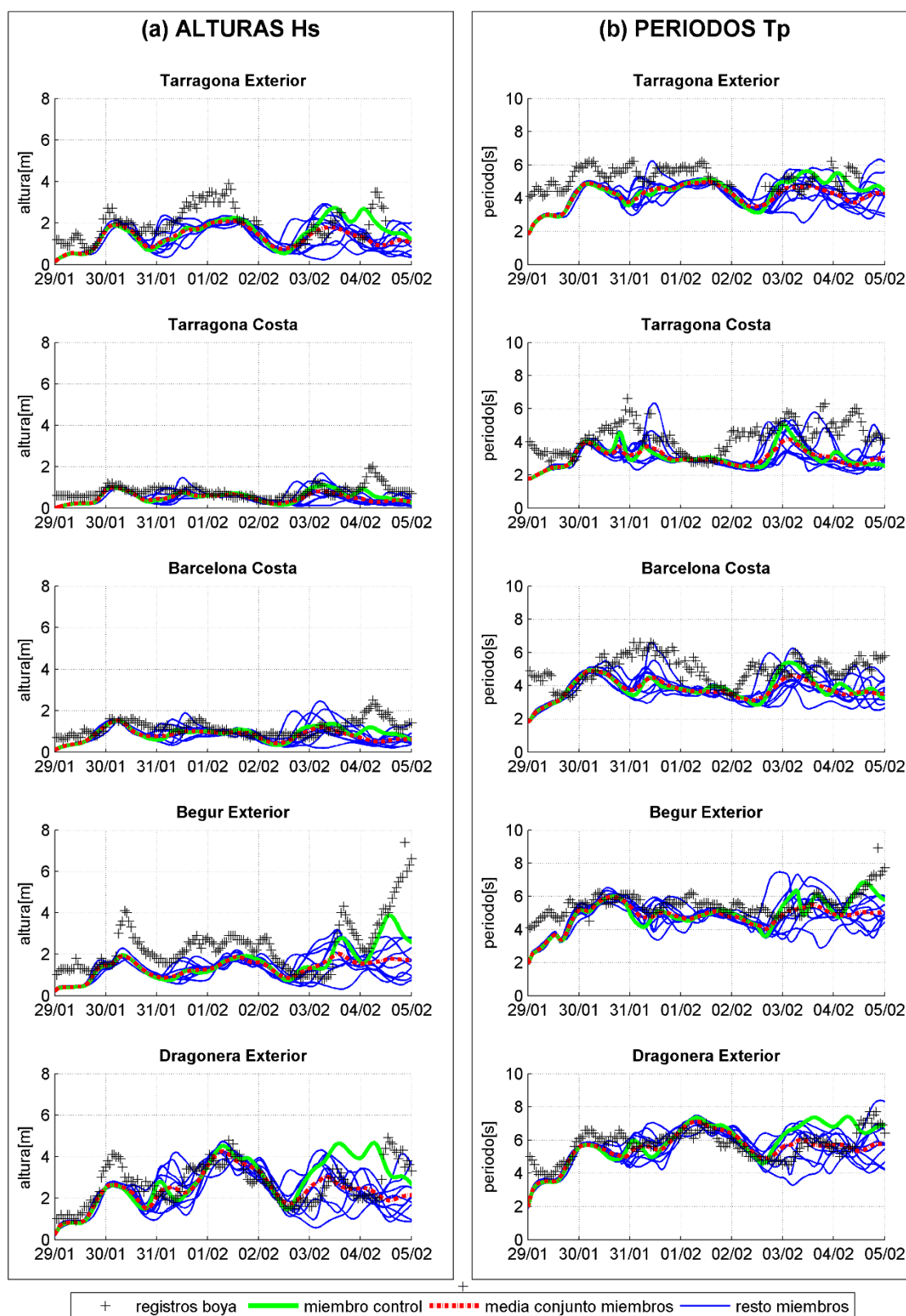


Figura 65: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 29/01/2015 con un horizonte de 8 días. Para cada boyas se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boyas, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

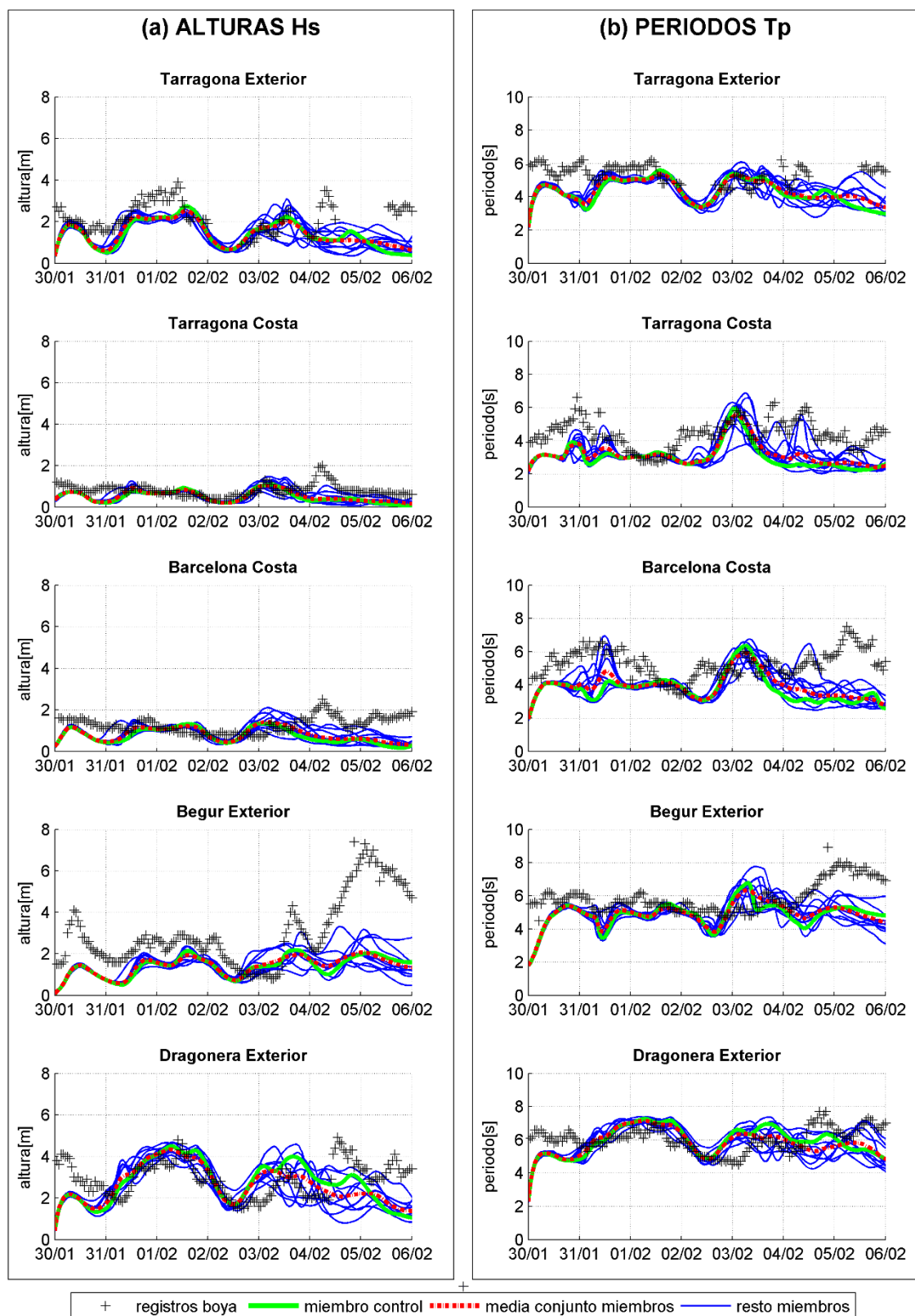


Figura 66: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 30/01/2015 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

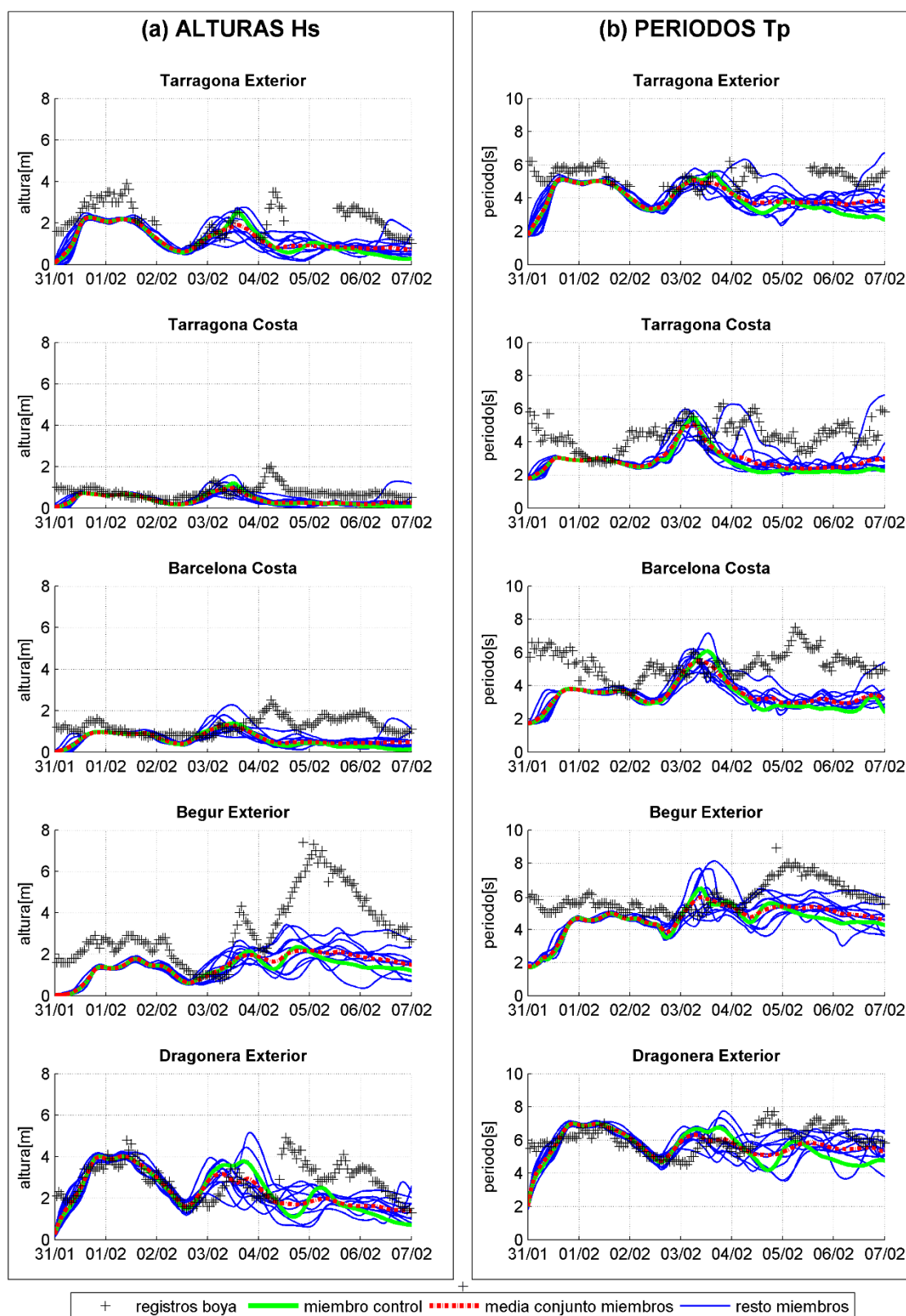


Figura 67: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 31/01/2015 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

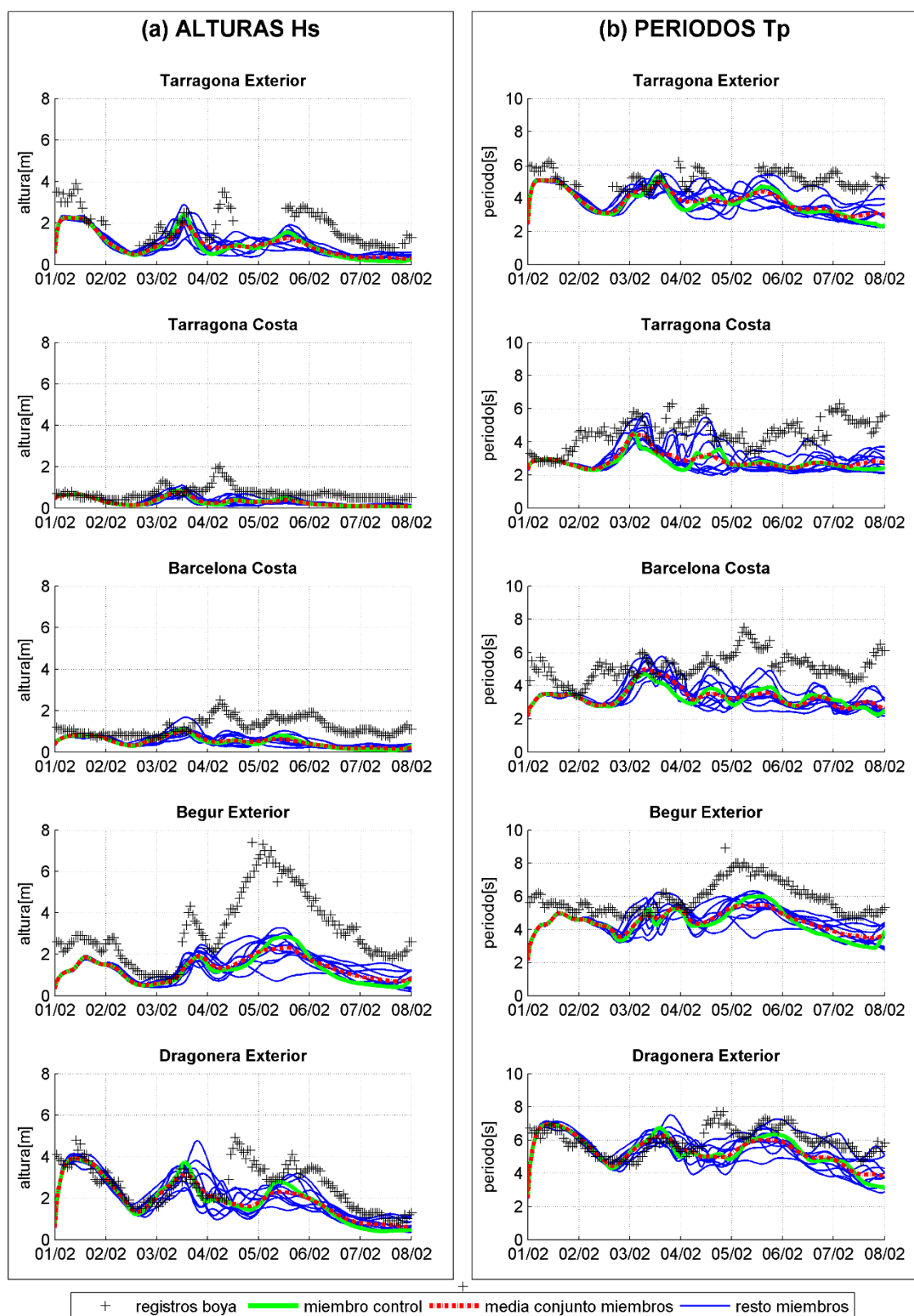


Figura 68: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 01/02/2015 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en la boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

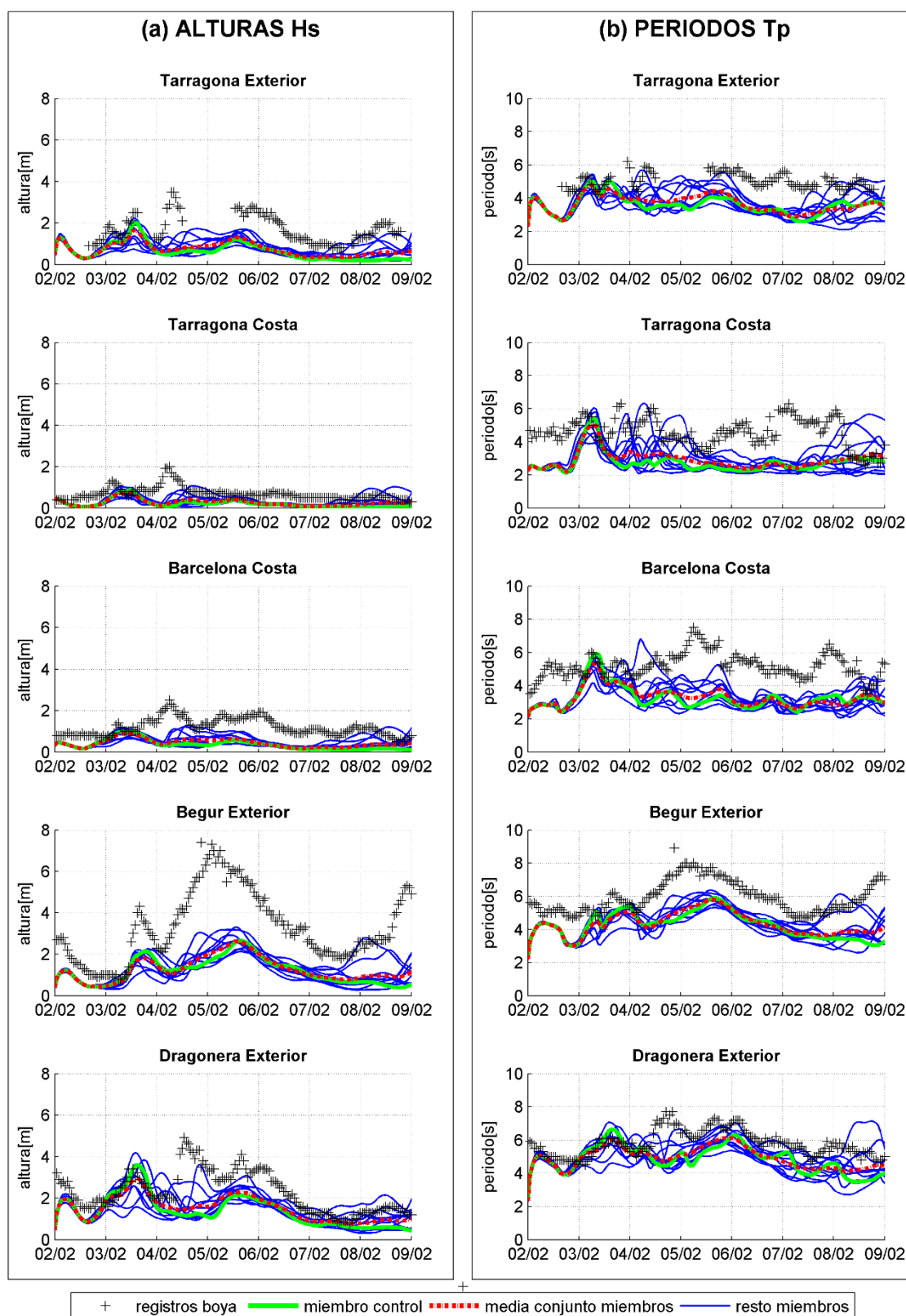


Figura 69: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 02/02/2015 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en la boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

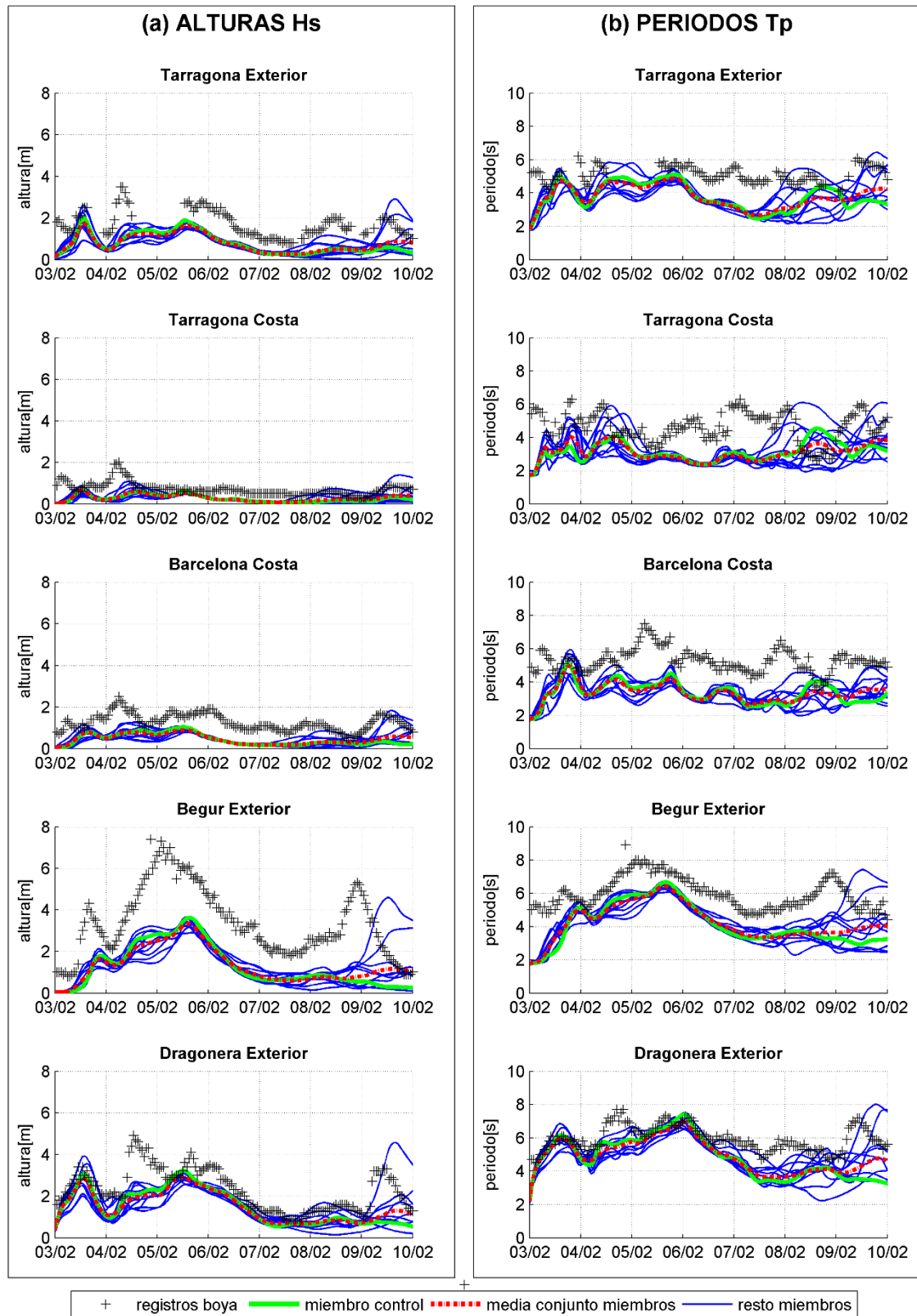


Figura 70: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 03/02/2015 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

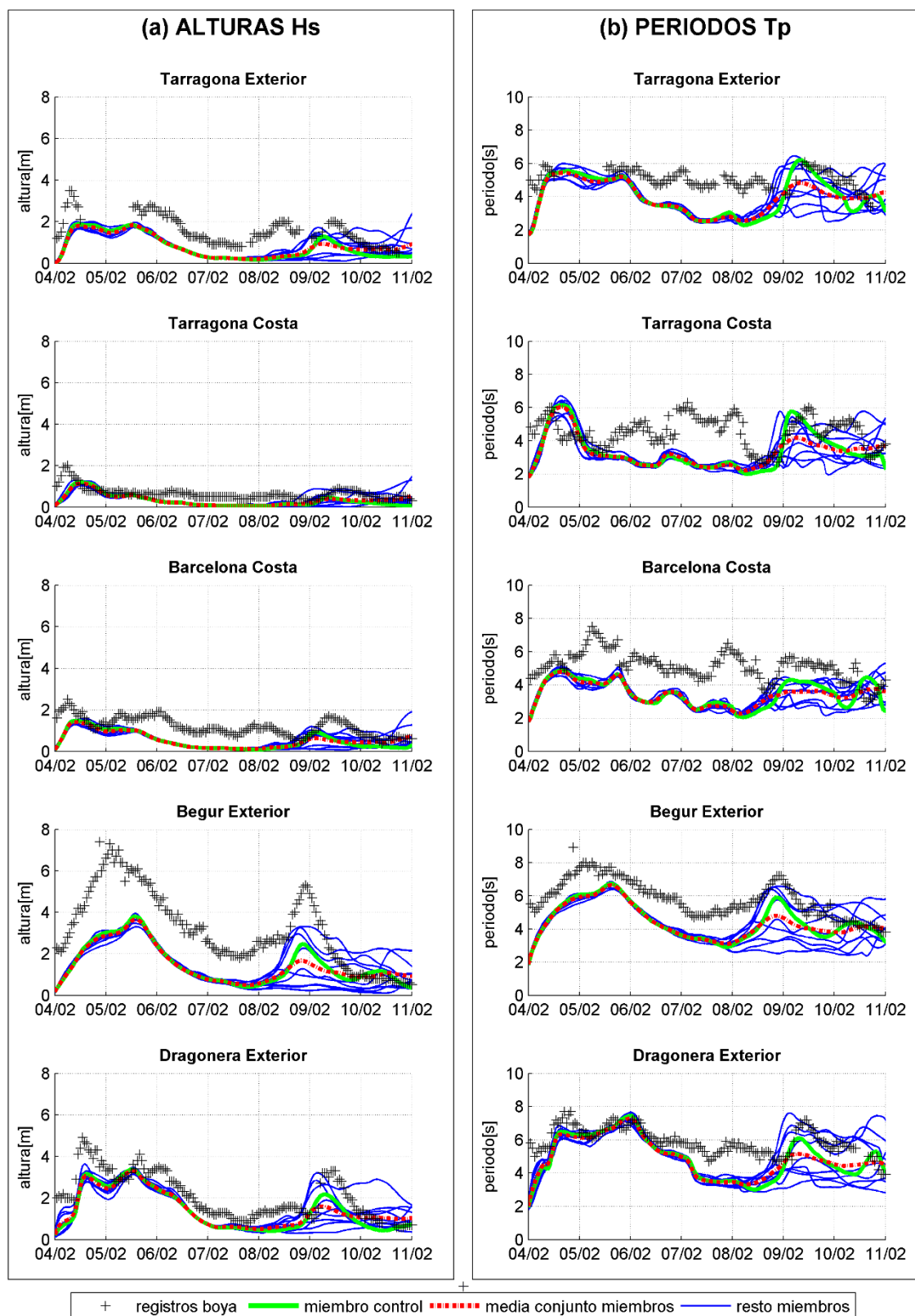


Figura 71: Series temporales de los diferentes miembros del conjunto a partir de la predicción del día 04/02/2015 con un horizonte de 8 días. Para cada boya se han representado las gráficas de: a) las alturas del oleaje (H_s) y b) los periodos (T_p) donde la línea discontinua negra corresponde a los datos reales registrados en las boya, la línea verde al miembro control, la línea roja discontinua la media de la predicción, mientras que los restantes miembros se representan con la línea azul más fina.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este Capítulo se comentan los aspectos más significativos que se extraen de los resultados que se han mostrado en el Capítulo anterior.

6.1. PRINCIPALES CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Por una parte las gráficas de mapas y series temporales de altura del oleaje durante los temporales permiten inferir el siguiente comportamiento de las predicciones:

- En un mismo instante temporal (un mismo horizonte) la distribución espacial del oleaje difiere miembro a miembro. Es decir cada miembro tiene un comportamiento diferente.
- Las diferencias entre miembros se reducen cuando el horizonte de predicción se reduce.
- El pico de la tormenta es predicho por cada vez más miembros cuando el horizonte se reduce. La consecuencia es que la probabilidad de detección (de sobrepasar un oleaje umbral) también aumenta en los mapas de probabilidad cuando el horizonte es menor.

Esto concuerda con el comportamiento esperado de una predicción por Técnicas de Conjuntos, donde se espera que los diferentes miembros del conjunto reproduzcan la variabilidad asociada a un sistema caótico cuando evoluciona con el tiempo.

Por otra parte se puede observar que en general las predicciones presentan correlación con los registros de las boyas. No obstante, los valores de los miembros se sitúan casi siempre por debajo de los registros, ya que a partir de la comparación de las series temporales con los registros de las boyas se muestra que existe una infravaloración sistemática de la altura del oleaje en las predicciones generadas. Este comportamiento se vuelve más acusado en las situaciones donde la altura del oleaje es mayor, que es precisamente cuando mayor necesidad se tiene de disponer de predicciones fiables. Ligado a este efecto también se observa una disminución de las duraciones efectiva de los temporales, sobretodo en la determinación del final de éstos ya que la rampa de inicio de un temporal en general se predice correctamente.

Lamentablemente, la aplicabilidad de una predicción por conjuntos se reduce si la media de las predicciones está descentrada respecto los valores reales. Idealmente el resultado de la distribución del conjunto de predicciones debería estar centrada (en valor esperado) en la distribución de los valores que se registran experimentalmente. En nuestro caso esto no es así, lo que se refleja en los bajos valores de probabilidad de excedencia de una determinada altura de oleaje obtenidos en los mapas de probabilidad.

Por tanto como conclusión de las simulaciones llevadas a cabo podemos establecer que aunque se predice la aparición de los temporales de una manera cualitativa, no sería posible utilizar estos datos para realizar predicciones precisas.

A continuación se discute la posible causa subyacente de este problema y se proponen las posibles soluciones.

6.2. LA RESOLUCIÓN DEL CAMPO DE VIENTOS

Es bastante razonable pensar que la infravaloración de la altura del oleaje está relacionada con un menor contenido de energía en el mar respecto de lo que sería esperable. En este sentido se ha reportado (Alomar et al., 2014) que la resolución (espacial y temporal) del campo de vientos afecta a la altura del oleaje en las predicciones.

Este efecto está causado por la pérdida de variabilidad del campo de vientos si la resolución con la que se trabaja es demasiado baja, lo cual produce un filtrado del campo de vientos, apareciendo más uniforme de lo que en realidad en el cálculo numérico de la ecuación del balance. El resultado es que la transferencia de energía del aire al agua es menor que la real.

Esto es muy probablemente lo que esté afectando las predicciones, ya que aunque se ha trabajado con una resolución aceptable en el modelo SWAN, los datos de viento con que se alimentaba sólo tenían una resolución de 1 grado (aproximadamente 100 km). A título de ejemplo Alomar obtiene las mejores predicciones de los picos de temporal para una resolución de espacial 12 km cada 3 horas, lo cual es una diferencia notable.

En nuestro caso la buena predicción de la rampa de inicio de un temporal en contraste con una duración de los temporales menor por una finalización temprana también apoyaría esta hipótesis, puesto que tendríamos un menor crecimiento del temporal al ser la transferencia de energía para vientos grandes más reducida que la real y en consecuencia el ritmo de acumulación de energía en el mar también sería menor.

6.3. PROPUESTAS DE SOLUCIÓN

Llegados a este punto, se podría considerar proceder según tres vías:

- 1) Repetir las simulaciones con unos campos de vientos de mayor resolución: Desafortunadamente es muy difícil conseguir estos datos, ya que se hace necesario disponer de recursos de cálculo muy intensivo, lo cual hace que no se proporcionen habitualmente por los servicios de predicción meteorológica, y aún menos de una predicción de un conjunto de miembro. Por tanto no es probable que en un futuro próximo campos de viento de la resolución necesaria estén disponibles para aplicaciones operativas (en la actualidad solo lo están para trabajos puntuales de investigación). Esta alternativa se considera por tanto descartada
- 2) Repetir las simulaciones introduciendo artificialmente una mayor transferencia de energía del viento al mar en el modelo. Esta alternativa que es un procedimiento pausable, aunque no demasiado satisfactoria desde un punto de vista científico pues implica un proceso ad-hoc, se puede implementar bien introduciendo un campo de vientos mayor que el real, bien

aumentando la transferencia de energía del viento al agua. No obstante tampoco se considera una alternativa viable porque requiere un proceso de calibrado de la mayoración del viento.

3) Aprovechar la información de los resultados ya obtenidos intentando corregir el error en la medida de lo posible. Considerando que los resultados aparecen casi siempre por debajo de los registros es evidente que al menos en una parte esto puede ser explicado por un error sistemático que es susceptible de ser eliminado. Esta es una alternativa económica computacionalmente que se explora a continuación.

6.4. VIABILIDAD DE LA CORRECCIÓN DEL ERROR DE LA PREDICCIÓN

Dada una serie temporal $X(1,...,n)$, en nuestro caso una predicción del oleaje, podemos imaginar que existe una función F tal que al aplicar la función sobre la serie obtenemos los resultados de la boya $B(n)=F(X(n),X(n-1),...,X(0))$

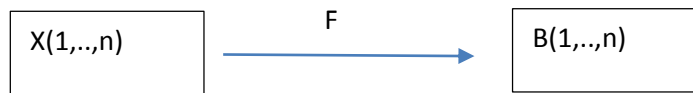


Figura 72 Esquema de $F(x)$

En general esta función F puede ser cualquiera y se obtiene a partir del ajuste de los datos, proceso que se denomina entrenamiento del modelo. En teoría su aplicación puede reproducir los resultados de la boya pero no hay garantías de que vuelva a generar buenos resultados.

Por tanto si no se tienen argumentos que justifiquen la elección de una forma determinada de función, se suele trabajar con modelos lineales en los cuales se determina un número limitado de parámetros. En este caso el ajuste siempre presenta un error (que será el mínimo en sentido cuadrático para el tipo de función elegida) el cual se espera que sea pequeño si el ajuste explica la mayor parte del comportamiento de las variaciones.

Aunque es razonable pensar que el estado del mar depende de estados previos (la energía acumulada tarda cierto tiempo en disiparse), por sencillez consideraremos que podemos predecir la altura del oleaje únicamente a partir de los datos del instante de tiempo que estamos considerando.

6.4.1 Resultados de la aplicación de un modelo lineal

Se ha optado por implementar el modelo lineal más general posible (*Unbiased Linear Combination*) propuesto por (Lenartz et al., 2010) basado en la introducción de combinaciones lineales de las predicciones más un término de bias (ecuación 13):

$$\begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,M} & 1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ x_{N_l,1} & \cdots & x_{N_l,M} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_{M+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_{N_l} \end{bmatrix} \quad [\text{Ec. 13}]$$

Como cada punto donde está situada una boya presenta unas condiciones diferentes se realizará el ajuste con los datos de cada boya por separado. En la ecuación anterior para nuestro caso la matriz X estará compuesta por los valores de predicción de cada miembro (ordenados en columnas) mientras que la variable y corresponde a la medida registrada en una boya. La variable w corresponde a los pesos que se asignan a cada miembro al resolver la ecuación anterior (control y 10 miembros), más el término de offset, con lo cual tiene dimensión 12.

Por otra parte w tiene una dimensión igual a todos los instantes temporales que se utilizan para el ajuste (el primer episodio estudiado 14 días-192 horas=2688). La matriz X tendrá por tanto una dimensión 12x2688.

Si realizamos el ajuste y lo aplicamos a datos no ajustados (del segundo episodio no estudiado) podemos comprobar en la figura siguiente que la predicción no es buena:

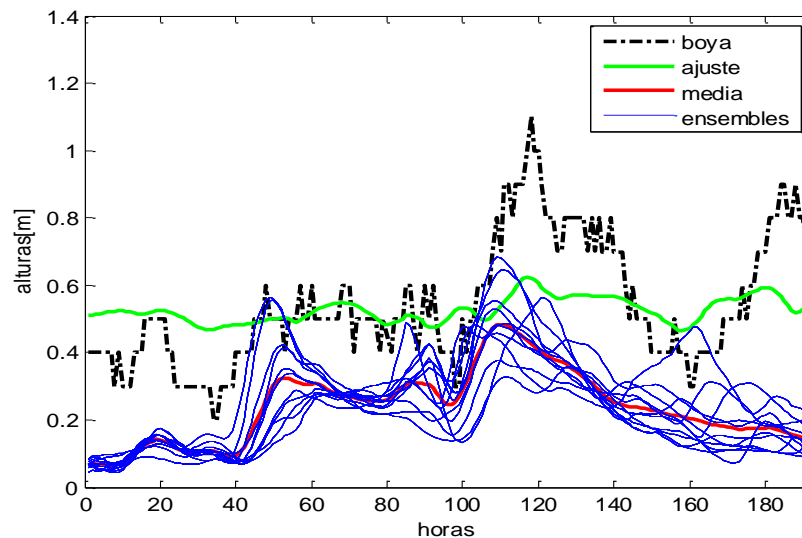


Figura 73: Predicción del modelo lineal entrenado aplicado a nuevos datos

Aunque vemos que sí que se podría decir que el termino offset corresponde en cierta forma a la infravaloración media del oleaje.

7. CONCLUSIONES

En esta Tesina se ha estudiado el comportamiento de las técnicas de conjuntos para la predicción del oleaje en la Costa Catalana, en especial durante episodios de temporales marítimos. Las técnicas de conjuntos consisten en generar varias predicciones simultáneamente, que representen adecuadamente la variabilidad asociada a la evolución de un sistema caótico.

Para realizar este estudio se han generado predicciones correspondientes a dos temporales de mar: 1) del 23/02/2013 al 09/03/2013 y 2) del 21/01/2015 al 04/02/2015. Estas predicciones se han generado utilizando la predicción los conjuntos de campos de viento que provee la NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) en el que cada miembro se ha utilizado como entrada en un modelo SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*) (Booij et al, 1999)(Ris et al., 1999) que ha generado como salida las diferentes predicciones del oleaje para cada miembro.

A partir de los mapas de altura de ola obtenidos se ha comprobado que la distribución espacial del oleaje difiere miembro a miembro. Es decir cada miembro tiene un comportamiento diferente. Además se ha constatado que las diferencias entre miembros se reducen cuando el horizonte de predicción se reduce y que las tormentas se predicen por cada vez más miembros cuando el horizonte se reduce.

Finalmente los resultados obtenidos se han comparado con las medidas experimentales de boyas pertenecientes a Puertos del Estado mediante series temporales. Se ha observado que si bien la aparición de temporales se predice aceptablemente, así como también el periodo del oleaje, existe una infravaloración sistemática de la altura del oleaje en las predicciones generadas.

Es muy probable que este efecto infravaloración esté causado por la baja resolución espacial de los campos de vientos usados en la predicción. Parece ser que la poca resolución de los datos de viento provoca una pérdida de información en el término fuente de la ecuación de balance espectral de la acción, hipótesis que puede ser objeto de futuros estudios.

Esta subestimación de oleaje limita la utilización de los mapas de probabilidad que era la principal ventaja de la predicción por conjuntos. Se ha intentado solventar el problema mediante la aplicación de un modelo lineal para corregir este error pero los resultados no han sido satisfactorios. Por esta razón, la conclusión de esta tesis es que serían necesarios campos de viento de mayor resolución para aplicar estas técnicas. Desafortunadamente conjuntos de viento de esta resolución por lo general no están disponibles

Algunos resultados de esta tesina forman parte de los contenidos de un poster presentado en el congreso de la Unión Europea de Geociencias (EGU) del año 2015 (Pallares et al., 2015).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEMET., 2015. Servicios Meteorológicos Marinos. [en línea]. [consulta: 4 abril 2015].
 Disponible en:
http://www.aemet.es/es/conocermas/maritima/detalles/Servicios_Meteorologicos_Marinos.

Alomar, M. et al., 2014. Wave growth and forecasting in variable, semi-enclosed domains. *Continental Shelf Research* [en línea]. Vol. 87, p. 28-40. ISSN 02784343. DOI 10.1016/j.csr.2014.05.008. [consulta: 10 mayo 2015]. Disponible en:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278434314001897>.

Battjes, J., 1994. Shallow water wave modelling. *Proc. Int. Symp.: Waves – Physical and Numerical Modeling*. p. 1 - 23.

Bolaños, R. et al., 2009. The XIOM: 20 years of a regional coastal observatory in the Spanish Catalan coast. *Journal of Marine Systems* [en línea]. Elsevier B.V., Vol. 77, no. 3, p. 237-260. ISSN 09247963. DOI 10.1016/j.jmarsys.2007.12.018. Disponible en:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2007.12.018>.

Booij, N., Ris, R.C. y Holthuijsen, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions. I- Model description and validation. *Journal of geophysical research* [en línea]. Vol. 104, no. C4, p. 7649-7666. ISSN 0148-0227. DOI 10.1029/98jc02622. Disponible en:
<http://www.agu.org/pubs/crossref/1999/98JC02622.shtml> \n <http://192.102.233.13/journals/jc/v104/iC04/98JC02622/98JC02622.pdf>.

Buizza, R., 2012. *Approaches to ensemble prediction : the TIGGE ensembles* [en línea].
 Disponible en:
<https://software.ecmwf.int/wiki/display/~ner/ECMWF+NWP+Training+Course+lectures>.

Cavaleri, L. y Rizzoli, P.M., 1981. Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications. *Journal of Geophysical Research: Oceans* [en línea]. Vol. 86, no. C11, p. 10961-10973. ISSN 2156-2202. DOI 10.1029/JC086iC11p10961. Disponible en:
<http://dx.doi.org/10.1029/JC086iC11p10961>.

Cedó, F., 2011. El temporal devora las playas del Maresme. *El Periódico* [en línea]. 22 noviembre 2011, Disponible en: <http://www.elperiodico.com/es/noticias/sociedad/temporal-devora-las-playas-del-maresme-1233885>.

Delft University of Technology., 2015. SWAN Scientific and Technical Documentation. . Delft, The Netherlands:

Du, J., 2007. Uncertainty and Ensemble Forecast. *Science and Technology Infusion Climate Bulletin* [en línea]. p. 42. Disponible en:
<http://www.weather.gov/ost/climate/STIP/STILecture1.pdf>.

El Periódico., 2013. Olas gigantes en el Puerto Olímpico de Barcelona. *El Periódico* [en línea]. 7 marzo 2013, Disponible en: <http://www.elperiodico.com/es/videos/barcelona/olas-gigantes-puerto-olimpico-barcelona/2196872.shtml>.

<ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Projects/Reforecast2>. [en línea]. [consulta: 4 abril 2015]. Disponible en: <ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Projects/Reforecast2>.

GEBCO. [en línea]. [consulta: 1 enero 2014]. Disponible en: <http://www.gebco.net/>.

Government of Canada., 2013. What is GRIB - Environment Canada. [en línea]. [consulta: 7 abril 2015]. Disponible en: https://weather.gc.ca/grib/what_is_GRIB_e.html.

Guillén, J., 2008. Els riscos litorals a Catalunya. [en línea]. Disponible en: http://www15.gencat.net/cads/AppPHP/images/stories/publicacions/informesespecials/2008/els_riscos_litorals_a_catalunya.pdf.

Hamill, T.M. et al., 2013. NOAA's second-generation global medium-range ensemble reforecast dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol. 94, no. 10, p. 1553-1565. ISSN 00030007. DOI 10.1175/BAMS-D-12-00014.1.

Hasselmann, K., 1974. On the spectral dissipation of ocean waves due to white capping. *Boundary-Layer Meteorology* [en línea]. Vol. 6, no. 1-2. ISSN 0006-8314. DOI 10.1007/BF00232479. [consulta: 6 abril 2015]. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/BF00232479>.

Holthuijsen, L.H., 2007. *Waves in oceanic and coastal waters* [en línea]. Cambridge : Cambridge University Press. ISBN 9780521860284. [consulta: 6 abril 2015]. Disponible en: http://cataleg.upc.edu/record=b1327690~S1*cat.

Janssen, P.A.E.M., 1991. Quasi-linear Theory of Wind-Wave Generation Applied to Wave Forecasting. En: , *Journal of Physical Oceanography* [en línea]. American Meteorological Society, Vol. 21, no. 11, p. 1631-1642. ISSN 0022-3670. DOI 10.1175/1520-0485(1991)021<1631:QLTOWW>2.0.CO;2. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485\(1991\)021<1631:QLTOWW>2.0.CO](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485(1991)021<1631:QLTOWW>2.0.CO).

Komen, G.J., Hasselmann, K. y Hasselmann, K., 1984. On the Existence of a Fully Developed Wind-Sea Spectrum. *Journal of Physical Oceanography*. Vol. 14, no. 8, p. 1271-1285. ISSN 0022-3670. DOI 10.1175/1520-0485(1984)014<1271:OTEOAF>2.0.CO;2.

La Vanguardia., 2010. El temporal pasa y Catalunya recupera el orden. *La Vanguardia* [en línea]. 9 marzo 2010, Disponible en: <http://www.lavanguardia.com/ciudadanos/noticias/20100309/53897404226/el-temporal-pasa-y-catalunya-recupera-el-orden.html>.

Lenartz, F. et al., 2010. Super-ensemble techniques applied to wave forecast: Performance and limitations. *Ocean Science*. Vol. 6, no. 2, p. 595-604. ISSN 18120784. DOI 10.5194/os-6-595-2010.

Lorenz, E.N., 1963. Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences* [en línea]. Vol. 20, no. 2, p. 130-141. ISSN 0022-4928. DOI 10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2. [consulta: 9 febrero 2015]. Disponible en: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469%281963%29020%3C0130%3ADNF%3E2.0.CO%3B2>.

- Miles, J.W., 1957. On the generation of surface waves by shear flows. *Journal of Fluid Mechanics* [en línea]. Cambridge University Press, Vol. 3, no. 02, p. 185. ISSN 0022-1120. DOI 10.1017/S0022112057000567. [consulta: 8 abril 2015]. Disponible en: http://journals.cambridge.org/abstract_S0022112057000567.
- National Climatic Data Center., 2015. Global Ensemble Forecast System (GEFS). [en línea]. [consulta: 8 abril 2015]. Disponible en: <http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-ensemble-forecast-system-gefs>.
- NCTOOLBOX A Matlab toolbox for working with common data model datasets* [en línea]. [consulta: 7 abril 2015]. Disponible en: <https://github.com/nctoolbox/nctoolbox>.
- NOAA., 2006. Ensemble Prediction Systems: A basic training manual targeted for operational meteorologists. [en línea]. [consulta: 7 abril 2015]. Disponible en: <http://www.hpc.ncep.noaa.gov/ensembletraining/>.
- NOAA/ESRL., 2015. ESRL/PSD GEFS Reforecast 2 Project. [en línea]. [consulta: 8 abril 2015]. Disponible en: <http://esrl.noaa.gov/psd/forecasts/reforecast2/>.
- Pallares, E. et al., 2015. Wave ensemble forecast in the Western Mediterranean Sea , application to an early warning system . *EGU General Assembly*. p. 661009.
- Pallares, E., Sánchez-Arcilla, A. y Espino, M., 2014. Wave energy balance in wave models (SWAN) for semi-enclosed domains—Application to the Catalan coast. *Continental Shelf Research* [en línea]. Elsevier, Vol. 87, p. 1-13. ISSN 02784343. DOI 10.1016/j.csr.2014.03.008. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0278434314001022>.
- Phillips, O.M., 1957. On the generation of waves by turbulent wind. *Journal of Fluid Mechanics* [en línea]. Cambridge University Press, Vol. 2, no. 05, p. 417-445. ISSN 0022-1120. DOI 10.1017/S0022112057000233. [consulta: 10 mayo 2015]. Disponible en: http://journals.cambridge.org/abstract_S0022112057000233.
- Puertos del Estado., 2012a. CONJUNTO DE DATOS: REDCOS. [en línea]. [consulta: 7 abril 2015]. Disponible en: http://calipso.puertos.es/BD/informes/INT_REDCOS.pdf.
- Puertos del Estado., 2012b. CONJUNTO DE DATOS: REDEXT. [en línea]. Disponible en: http://calipso.puertos.es/BD/informes/INT_REDEXT.pdf.
- Puertos del Estado.FAQ - redes de medida/predicciones | puertos.es. [en línea]. [consulta: 7 abril 2015]. Disponible en: <http://www.puertos.es/es-es/Paginas/FAQ.aspx#faq2>.
- Puertos del Estado. [en línea]. [consulta: 1 enero 2015]. Disponible en: www.puertos.es.
- Ris, R.C., Holthuijsen, L.H. y Booij, N., 1999. A third-generation wave model for coastal regions: 2. Verification. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 104, no. C4, p. 7667. ISSN 0148-0227. DOI 10.1029/1998JC900123.
- Snyder, R.L. et al., 1981. Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves. *Journal of Fluid Mechanics* [en línea]. Cambridge University Press, Vol. 102, no. January 1981, p. 1. ISSN 0022-1120. DOI 10.1017/S0022112081002528. [consulta: 8 abril 2015]. Disponible en: http://journals.cambridge.org/abstract_S0022112081002528.

Taylor, K.E., 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 106, no. D7, p. 7183-7192. ISSN 0148-0227. DOI 10.1029/2000JD900719.

The Mathworks. *MATLAB and Simulink for Technical Computing - MathWorks España* [en línea]. [consulta: 7 abril 2015]. Disponible en: <http://es.mathworks.com/>.

TU Delft: SWAN. [en línea]. [consulta: 7 abril 2015]. Disponible en: <http://www.swan.tudelft.nl/>.

University Corporation for Atmospheric Research., 2006. MetEd » Resource Description: Explicación de la predicción por conjuntos. [en línea]. [consulta: 7 abril 2015]. Disponible en: https://www.meted.ucar.edu/training_module.php?id=228#.VSQkFo6ng5t.

LISTA DE ACRÓNIMOS

BSBT: Backward Space Backward Time.

DIA: Discrete Interaction Approximation.

ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

ESRL/PSD: Earth System Research Laboratory/Physical Sciences Division.

GEBCO: General Bathymetric Chart of the Oceans.

GFS: Global Forecast System.

GRIB: Gridded Binary.

IFS: Integrated Forecast System.

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration.

NCEP: National Centers for Environmental Prediction.

MATLAB: MATrix LABoratory.

SWAN: Simulating WAVes Nearshore.